



DE PROFUNDIS:

HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN
DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE
LA TIERRA EN ARQUITECTURA.

TESIS DOCTORAL
SEVILLA, SEPTIEMBRE DE 2015

DOCTORANDO: CRISTINA ALBA PÉREZ-RENDÓN
DIRECTOR: JOSÉ MARÍA CABEZA LAÍNEZ

DEPARTAMENTO DE HISTORIA, TEORÍA Y COMPOSICIÓN ARQUITECTÓNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE SEVILLA

PROGRAMA DE DOCTORADO:

ARQUITECTURA Y PATRIMONIO: INVESTIGACIÓN, REFLEXIÓN Y ACCIÓN

Agradecimientos

A todas las personas que han hecho posible esta investigación, al Dr. José María Cabeza Lainez, al Arq. Luciano Mingotto, a Enrico Gleria, al Arq. Agustín Adarve, y, sobre todo, a mi familia, especialmente a Miguel por compartir su primer año de vida con esta Tesis

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	MARCO TEÓRICO.....	11
1.1.1	CONTEXTO	11
1.1.2	FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA SOLAR	13
1.1.3	FUNDAMENTOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL	15
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	20
2	HERRAMIENTAS DE CÁLCULO	24
2.1	MODELOS DE CÁLCULO ANALÍTICO.	24
2.1.1	MODELO DE BENKERT, HEDIDT Y SCHÖLER.	24
2.1.2	MODELO DE CALCULO HOLLMULLER.....	33
2.2	FORMULACIÓN DE INTERCAMBIADORES ENTERRADOS POR CONVECCIÓN NATURAL (IECN)	37
2.3	HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN-VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	42
3	REFRIGERACIÓN PASIVA EN EL RENACIMIENTO. ESTUDIO DE LAS VILLAS PNEUMÁTICAS DEL VENETO.	43
3.1	CONTEXTO HISTÓRICO: EL AIRE EN LA ARQUITECTURA DEL RENACIMIENTO	43
3.2	CONTEXTO GEOGRÁFICO: CLIMA Y GEOLOGÍA.....	53
3.2.1	CLIMA	53
3.3	ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO DE LAS VILLAS, SIMULACIONES Y MEDICIONES.....	56
3.3.1	EL CÓVOLO DE LOS VIENTOS Y EL SISTEMA DE VENTIDOTTI.....	62
3.3.2	VILLAS CONECTADAS A VENTIDOTTI.....	89

3.3.3	VILLAS CONECTADAS A COVOLI	133
3.3.4	VILLAS CON SÓTANO COMO INTERCAMBIADOR	151
3.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	180
4	APLICACIÓN DE INTERCAMBIADORES TIERRA-AIRE A CLIMAS TROPICALES.	190
4.1	CASO PRÁCTICO 1	191
4.2	CASO PRÁCTICO 2	196
4.3	CASO PRÁCTICO 3	199
5	CONCLUSIONES.....	206
6	ANEXOS.....	211
6.1	ANEXO 1.....	212
6.2	ANEXO2. TEXTOS.	213
6.2.1	VIRGILIO, LA ENEIDA FRAGMENTO SOBRE EOLIA	213
6.2.2	VITRUVIO LIBRO PRIMERO, CAPITULO 4. LA SALUBRIDAD DE LOS ELEMENTOS	215
7	ÍNDICE DE FIGURAS	221
8	BIBLIOGRAFÍA.....	235

1 INTRODUCCIÓN

En tiempos recientes, la arquitectura ha tratado con cierto empeño de volver a la naturaleza como principal objeto de conocimiento. El arquitecto japonés Toyo Ito, conocido por sus proyectos ambientales, dijo en una entrevista hace pocos años:

A menos que volvamos a poner la arquitectura y la naturaleza en una relación más estrecha entre ellas, no tenemos ninguna posibilidad de progresar en áreas como la Ecología o la Sostenibilidad. Una de las cuestiones que solían caracterizar la arquitectura tradicional japonesa, es una estética que contempla la naturaleza y la arquitectura como contigüidades, con una frontera muy tenue y ambigua entre las dos. Esto fue desapareciendo con la las ideas occidentales que formaron parte de la modernización emprendida durante la era Meiji (1868-1912).¹

Efectivamente, en el ser más arcano y profundo de Asia Oriental, reflejado en su filosofía daoísta, encontramos este anhelo por una fusión con la naturaleza, de ello dan fiel testimonio los versos del poeta Bai Juyi, de la dinastía Tang.

*Mi nueva cabaña tiene tres vanos y cinco
columnas*

*Con escalones de piedra, pilares de madera de
Katsura*

y paredes de bambú

*El pórtico del Sur deja entrar la radiación del sol
de invierno*

La puerta del Norte acoge los vientos

¹ Toyo Ito. Arquitectura para capturar la luz. 2009.

y los meses de verano son frescos
La cascada que atraviesa el refugio apenas
salpica
Los bambúes que al inclinarse acarician la
ventana
no están alineados
La próxima primavera arreglaré la techumbre
de paja del ala Este
En la sala de papel y persianas de bálago
pondré poemas de Meng Guang²

Y también, en el primer verso de la "Visión de Primavera" de DuFu³ se dice:

En un país arruinado, los montes y los ríos
perduran.

Tales poetas están prefigurando los principios de lo que en el siglo veinte daría en llamarse Arquitectura Bioclimática, pero además están haciendo corpóreo el verso de Hölderlin que tanto obsesionara a Martin Heidegger:

Lleno de méritos, más poéticamente,
habita el ser humano sobre esta tierra.

Este singular espacio de predominio de la naturaleza sobre la materia, aparece con claridad en la casa japonesa de la era Meiji, antes citada, que encontramos representada en el cuadro de Renzo Kita Fig. 1.1, donde se describe la muerte del

² BAI JUYI (772-846) Al pie del Pico Incensario

³ DU FU (712-770), renombrado poeta de la Dinastía Tang.

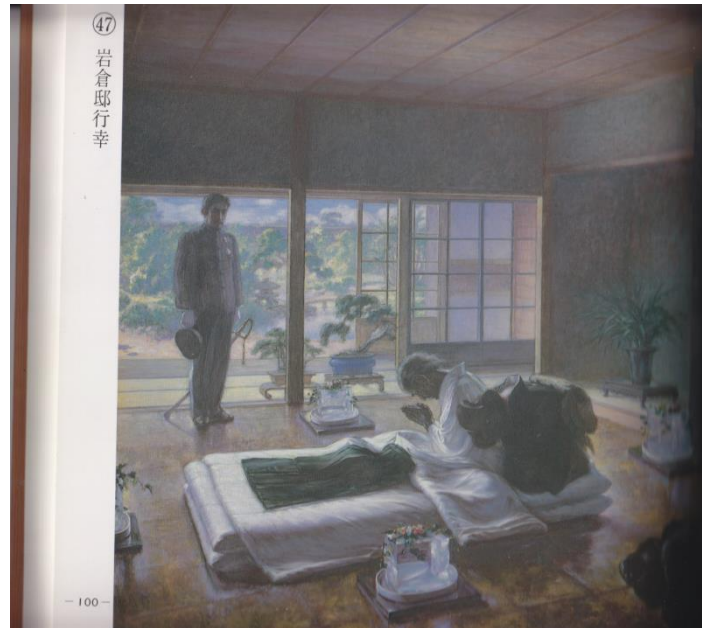


Fig. 1.1. Pintura de Renzo Kita

ministro Tomomi Iwakura. Observemos que hasta el propio aire se ha solidificado en bloques de hielo para refrescar.

Desde los tiempos más remotos el Ser Humano ha intentado dotarse con un potencial, es decir, aprovisionarse de la energía de la Naturaleza y almacenarla para los tiempos de escasez.

Hoy sabemos además gracias a la física cuántica que la materia no es más que una de las dimensiones del espacio, con lo cual se ha puesto fin a la antigua división aristotélica entre lo material y lo inmaterial.

Al principio de la Historia, la única energía disponible era la materia modelada por la geología del tiempo, es decir el propio terreno. Tal como ocurre en muchos de los recintos hipogeos del antiguo Egipto.

Más adelante, cuando comienza a valorarse el vacío como espacio en la arquitectura, aunque para algunos tal espacio no sea sino una mera carcasa del tiempo (R. Smithson, 1965), se irá haciendo necesario distribuir la energía en el aire, a través de la radiación, la ventilación y la conducción, es decir los principales mecanismos de transmisión de la energía calorífica.

Uno de los principales objetivos de los arquitectos del Renacimiento era mejorar la eficacia del pneuma, aireación o ventilación, a fin de fomentar el bienestar. Por lo tanto, este pneuma resultaba un eslabón fundamental para establecer la armonía entre el cuerpo humano la arquitectura y el cosmos, y un edificio era concebido como un mediador entre el alma de sus habitantes y el anima mundi, el alma del mundo.

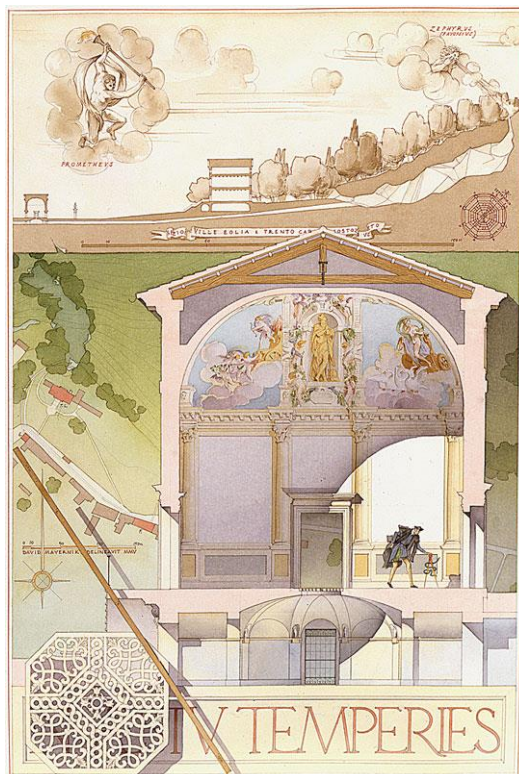


Fig. 1.2. Acuarela de Villa Eolia. David Mayernik

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 CONTEXTO

Según el informe WEO 2009 (Perspectivas Energéticas Mundiales) de la Agencia Internacional de la Energía⁴: “la recesión, al frenar momentáneamente el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, facilita, en principio, la misión de transformar el sector energético ofreciendo una oportunidad sin precedente, aunque relativamente limitada, para actuar a favor de la concentración de la inversión en tecnologías de baja emisión de carbono.” La mayor parte de las emisiones mundiales de CO₂ y NO_x provienen de la producción tradicional y uso de la energía eléctrica⁵, o sea, con el ahorro energético directamente reducimos las emisiones de los principales gases responsables del Calentamiento Global.

Las principales acciones para reducir las emisiones de CO₂ son la utilización de energías renovables y la mejora de eficiencia energética de su utilización por cada sector de la economía.

Pasamos la mayor parte de nuestra vida dentro de edificios, es dentro de ellos que consumimos grande parte de la energía producida, que en terminos globales llega a cerca del 30% de todo la generación. Por eso el sector de la construcción tiene grandes responsabilidades en construir edificios que consuman cada vez menos energía. Es muy importante también resaltar que la vida útil de un edificio es en media entre 50 a 100 años y que todavía es muy incierta la situación energética del futuro, o sea, los proyectos de hoy tienen que ser el máximo eficientes

⁴ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY., 2009. World Energy Outlook 2009. Resumenejecutivo. Paris: IEA: Internation Energy Agency.

⁵ ASOCIACIÓN DE FABRICANTES DE EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN and ATECYR, 1999. Impacto ambiental de la climatización: plan de calidad. Madrid: AFEC, Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización

energéticamente para construir un futuro sostenible para las próximas generaciones.

En el momento actual, se está produciendo un rápido crecimiento tanto poblacional como económico en países situados en las franjas tropicales, lo cual incide enormemente en la construcción, surgiendo una oportunidad de responder a ese incremento de manera más sostenible.

El clima en zonas tropicales se caracteriza por elevadas temperaturas y radiación además de altas humedades relativas y curvas climáticas prácticamente constantes a lo largo de todo el año. Se trata de condiciones climáticas que generan altos niveles de discomfort, por lo que una respuesta a las mismas mediante sistemas pasivos se hace imprescindible al tiempo que complicado.

La mayor parte de sistemas de enfriamiento pasivo son de difícil aplicación en este contexto. Las elevadas humedades relativas hacen necesarias unas tasas de ventilación muy altas para disipación de calor latente, al tiempo que dificultan la aplicación de soluciones de enfriamiento evaporativo. El aprovechamiento de la inercia térmica del terreno también se ve reducido dado el inexistente diferencial térmico anual.

Se hace por tanto necesario encontrar soluciones que aumenten considerablemente las renovaciones de aire al tiempo que permitan la introducción de aire más fresco.

Es en este ámbito que la climatización pasiva por combinación de geotermia por intercambiadores aire-tierra con ventilación natural surge como una importante herramienta para mejorar la eficiencia energética de los edificios al evitar o minimizar el uso de climatización y equipamientos mecánicos, al tiempo que permite mejorar la calidad del aire interior.

Una mayor adaptabilidad de los índices de confort a las condiciones reales unida a un mejor aprovechamiento de los

recursos naturales mediante diseños arquitectónicos más eficaces nos podría permitir minimizar el uso de sistemas de climatización activa e incluso llegar a la sustitución de los mismos, permitiéndonos aproximarnos más al objetivo de edificios de consumo casi nulo planteado por la directiva Europea para 2020.

1.1.2 FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA SOLAR

La geotermia solar se basa en el aprovechamiento del calor irradiado por el sol sobre la superficie de la tierra y de la inercia térmica del suelo para tomar o disipar calor a través de una superficie de contacto.

A partir de una determinada profundidad el terreno tiene la capacidad de amortiguar y/o desfasar la temperatura exterior, si circulamos un cierto volumen aire a través de un espacio cuyos límites se encuentran en contacto directo con ese terreno se producirá un intercambio de calor que supondrá una disipación del calor del aire en el suelo durante épocas más calurosas o una atemperación del mismo en épocas más frías. El movimiento de este aire a través de espacios subterráneos se puede provocar de manera mecánica o por corrientes convectivas como detallaremos más adelante.

PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS

Capacidad calorífica

La capacidad térmica de un suelo se obtiene por una media ponderada de las capacidades caloríficas de los materiales que lo componen respectivamente (minerales, materia orgánica, aire, agua).

Dado que tanto el agua como la materia orgánica se distinguen por una capacidad calorífica superior a los componentes minerales, un suelo húmedo almacenará mejor el calor que un suelo seco, de lo que se deduce que actuando

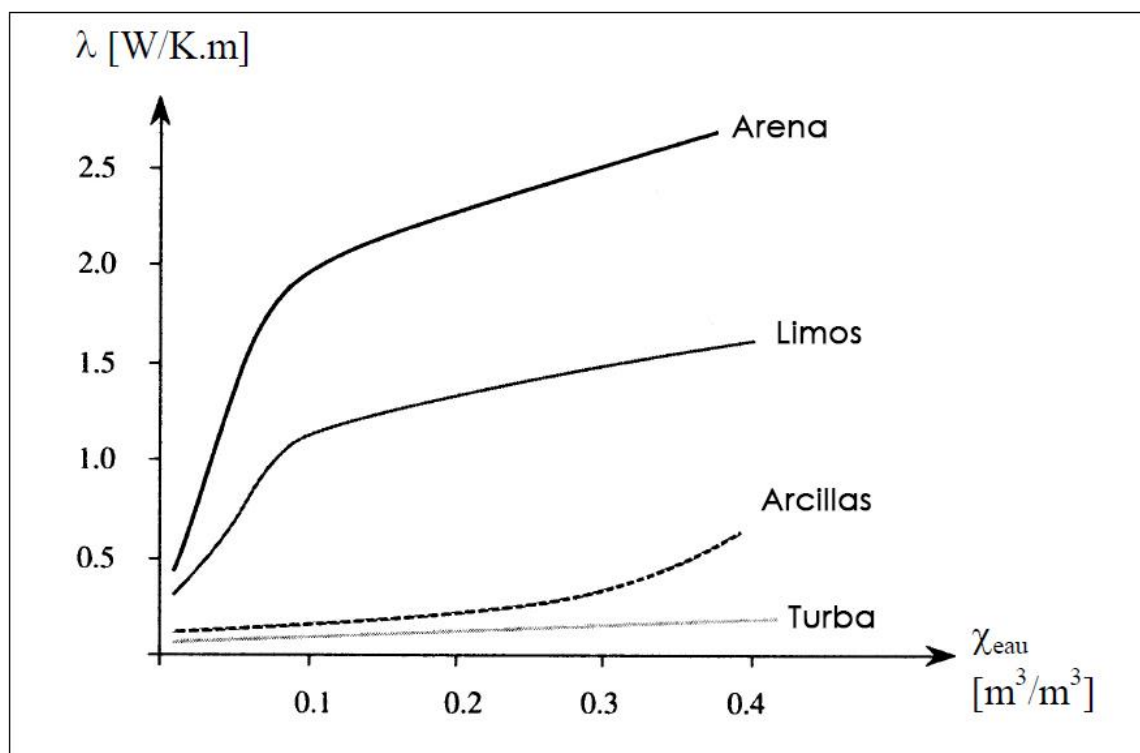
sobre la humedad del suelo se puede mejorar el rendimiento de los intercambiadores tierra-aire⁶.

Por otra parte, un suelo seco será más susceptible de un calentamiento rápido cuanto más poroso sea.

Conductividad térmica

La conductividad térmica de un suelo no dependería solo de su composición sino también de la forma en que se ordenan sus partículas, los enlaces entre las mismas (puentes de agua), así como su porosidad. Un suelo húmedo resulta mejor conductor que un suelo seco, al ser menor el volumen de aire que contiene.⁷

Fig. 1.3. Conductividad térmica de suelos en función de su contenido en agua (Musy y Soutter, 1991)



⁶ Alvarez et al, 1992

⁷ Todas estas ventajas que suponen los suelos húmedos sobre los suelos secos nos llevarán a considerar el interés de aplicar sistemas de intercambiadores tierra/aire en climas tropicales con altos niveles de humedad relativa.

1.1.3 FUNDAMENTOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL

La ventilación natural en el interior de edificios es el aire en movimiento debido a las diferencias de presión creadas a través de las distintas aberturas del edificio.

Algunos autores⁸ definen tres funciones básicas de la ventilación de edificios:

- Control de la Calidad del Aire: controlar la calidad del aire de edificios, por la dilución de los contaminantes del aire generados internamente con el aire limpio externo;
- Enfriamiento convectivo: enfriar los edificios renovando o diluyendo el aire caliente interior con el aire fresco exterior;
- Confort térmico: o enfriamiento psicológico, cuando el aire fresco externo pasa por la superficie de la piel a una velocidad suficiente para aumentar la disipación del calor de los ocupantes del edificio a través de la pérdida convectiva de calor y acelerando la evaporación.

Es importante aclarar que la ventilación natural si bien es causada por las mismas fuerzas naturales es diferente de la infiltración de aire en edificios, que puede ser definida como el flujo incontrolable de aire hacia dentro o fuera del edificio a

⁸ VALDES, O. 1999. Ventilación de los edificios. Un enfoque integrador y energético, Cuba. Dirección de Proyectos Ministerio de la Construcción.

GIVONI, B., 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and Buildings.

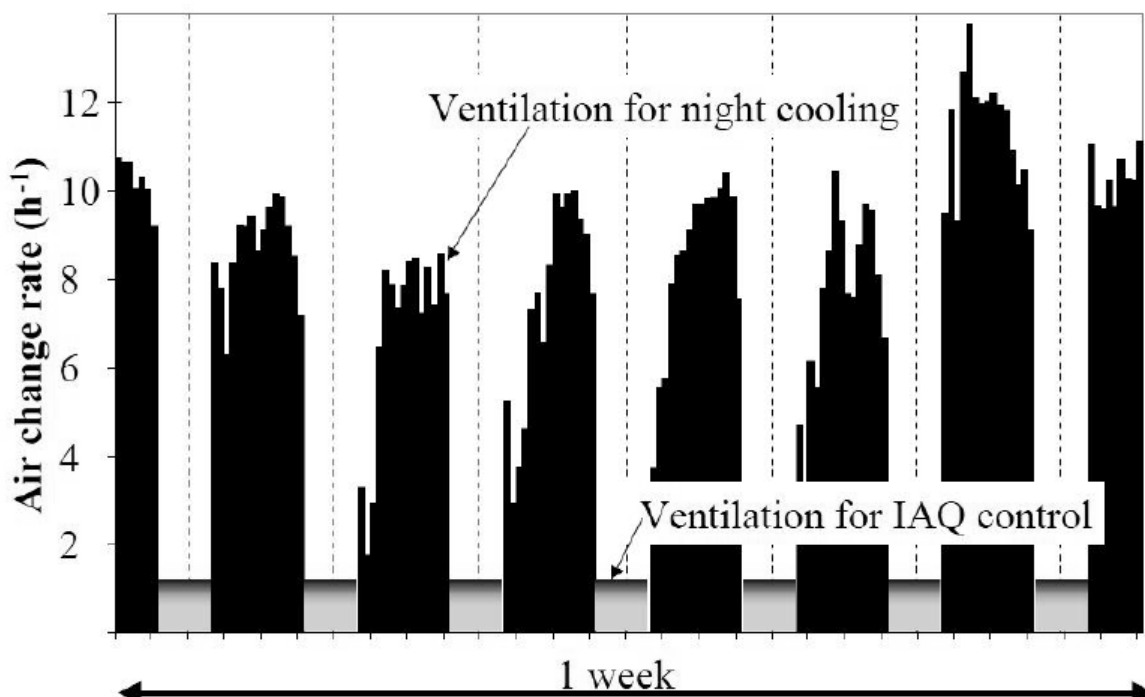
EMMERICH, S., et al., 2001. Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools. NIST: National Institute of Standards and Technology. Boulder, Colorado.U.S. Department of Commerce.

través de rendijas, imperfecciones de construcción o porosidad de los materiales del edificio.

Es posible dividir el estudio y la utilización de la ventilación natural en dos grandes temas: la ventilación para el enfriamiento y la ventilación para el control de la calidad del aire interior (o ventilación higiénica). Esta investigación se centrará principalmente en el primer tema. Esta separación se debe a la gran diferencia en las tasas de flujos de aire necesario para cada finalidad, como podemos ver en la Fig. 1.4. La ventilación natural para enfriamiento garantiza automáticamente las tasas mínimas necesarias para el control de la calidad del aire interior.

Sin embargo, mientras la ventilación natural es conceptualmente simple y la más barata opción para enfriar el edificio, es también la más difícil de controlar, ya que la ventilación natural debe ser planificada y no "simplemente suceder". Su desarrollo implica la forma de los edificios, el entorno y el clima, por eso su importancia debe ser reconocida en las etapas iniciales del proceso de diseño, antes de tomar decisiones que puedan hacerla inviable.

Fig. 1.4. Comparación entre las tasas de flujos de los dos temas. Fuente: GHIAUS et al, 2005



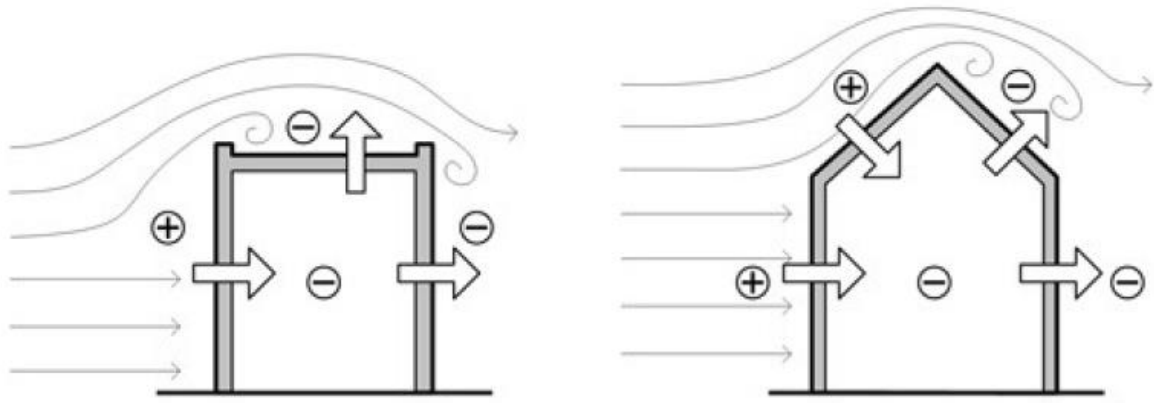


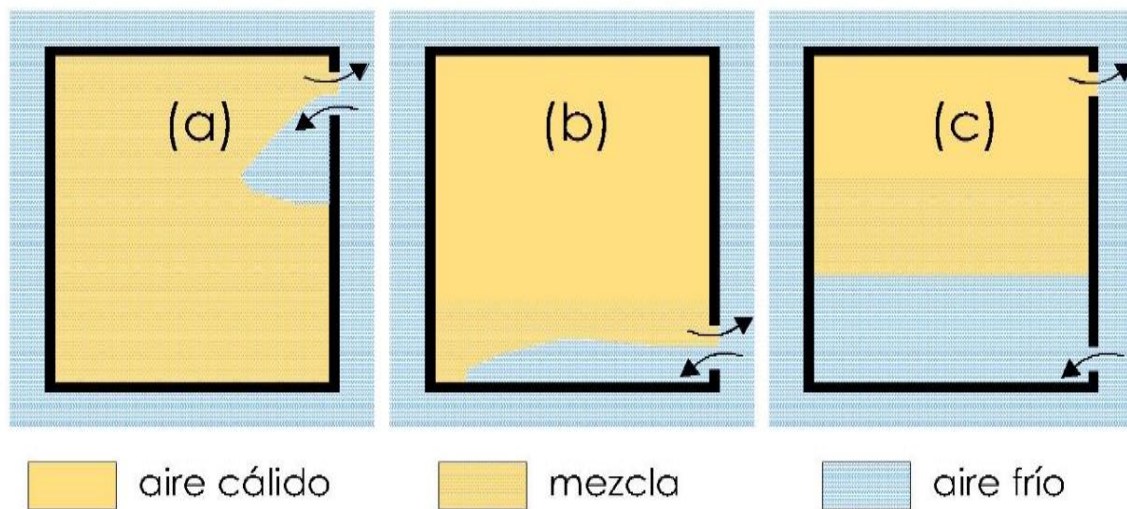
Fig. 1.5. Efecto de las presiones del viento sobre los edificios

La utilización de estrategias de refrigeración natural por medio del movimiento de aire frecuentemente presenta errores de diseño o patrones de uso erróneo, impidiendo aprovechar al máximo el potencial refrigerante o resultando incluso contraproducente. Por este motivo resulta fundamental la adquisición de conocimientos acerca de los mecanismos de transferencia de energía, así como las estrategias, los sistemas y los componentes de ventilación que potencian la efectividad de la refrigeración.

VENTILACIÓN CONDUCTIDA POR EL VIENTO⁹

El efecto del viento sobre un edificio está influenciado directamente por su forma y la proximidad de otras construcciones vecinas. Cuando el viento incide sobre un edificio, el aire es perturbado y desviado por encima y alrededor del mismo. Con esto son creadas las diferencias de presión sobre la construcción. En términos generales, las presiones son más altas en la fachada que da el viento, o sea, el lado de barlovento del edificio (zona de presión positiva), y más bajo en el lado de sotavento y en el techo (zona de presión negativa o zona de succión), y así se tiende a manejar un flujo

⁹ Ibid. 8



de aire dentro del edificio desde las aberturas a barlovento hacia a las que están a sotavento, como muestra la Fig. 1.5.

VENTILACIÓN CONDUCTIDA POR EL EFECTO STACK (CHIMENEA)¹⁰

En el caso del efecto Stack o efecto chimenea, la ventilación natural es resultado de la energía térmica del calentamiento solar incidente sobre la construcción que causa las diferencias de densidad en el aire y provocan las diferencias de presión.

En otras palabras, las diferencias de temperatura entre el interior y exterior de un edificio y entre los diferentes espacios dentro del edificio producen las fuerzas de empuje que conducen el flujo de aire. En contraste con el caso puramente impulsado por el viento, la presencia de estas fuerzas de empuje conduce a las variaciones de temperatura dentro del espacio.

La tendencia natural del aire caliente a ascender y acumularse hacia la parte superior de un ambiente lleva a una estratificación estable, y esto tiene una gran influencia en los patrones de flujo dentro del espacio. Esta estratificación puede dar lugar a muy diferentes configuraciones de flujo. Lo que

Fig. 1.6. Esquemas de la ventilación de mezclado y por desplazamiento. Fuente Thomas et al. 2006

¹⁰ Ibid. 8

determina la estratificación vertical en el ambiente es la ubicación de las aberturas.

Por ejemplo, cuando el aire interno es más cálido que el aire externo, una sola abertura en la parte superior del ambiente permitirá el intercambio del aire, el caliente hacia el exterior y el aire fresco hacia el interior, como se puede ver en Fig. 1.6(a). Al mismo tiempo, este intercambio de aire provoca una turbulencia dentro del espacio que tiende a mezclar el aire internamente, por eso este tipo de ventilación, también conocida como ventilación por mezclado, produce una distribución de temperatura relativamente uniforme en el ambiente.

En la misma situación, en el caso de que ésta sola abertura se ubique en la parte inferior del ambiente habrá un intercambio pasajero hasta que el aire fresco que adentra ocupe en el espacio la altura de la parte superior de la abertura, tras lo cual la ventilación cesará, como muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(b). Esta configuración no es, en general, una forma eficaz de ventilación. Ya en el caso de haber dos aberturas, una en la parte superior y otra en la parte inferior del espacio, el aire caliente interno menos denso saldrá por la abertura superior y el aire fresco externo entrará por la abertura inferior del espacio, como muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (c). Una configuración estable de densidad es formada entre la capa caliente en la parte superior y la capa más fría en la parte inferior, creando una variación de temperatura en espacio mayor que en la ventilación por mezclado.

El movimiento de aire por efecto Stack es tanto mayor cuanto mayor sea la columna de aire o el diferencial térmico. No siempre podemos diseñar arquitecturas que incorporen volúmenes adecuados para provocar este efecto, por lo que resulta interesante su implementación aumentando el

diferencial térmico. Si el aire que introducimos en la parte inferior del edificio es previamente enfriado por intercambio con el terreno, el diferencial térmico que podemos obtener es superior y, por lo tanto, la ventilación natural más eficiente.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La elección de la modalidad de refrigeración por ventilación natural combinada con geotermia aire-tierra responde a varios objetivos y necesidades:

1. La necesidad de incluir herramientas de cálculo sencillas y operativas en el diseño de Intercambiadores Enterrados por Convección Natural (IECN). En este sentido, las herramientas de cálculo y simulación que se usan de forma genérica para los diseños de geotermia no disponen de la posibilidad del cálculo de velocidad de aire de salida sin la incorporación de elementos mecánicos.

En las edificaciones estudiadas en esta tesis, este factor suponía un elemento clave ya que ninguna de ellas incorpora sistemas mecánicos para el flujo de salida del aire, por lo que el diseño y validación de una herramienta de cálculo específica era un objetivo de primer orden al tiempo que una necesidad.

A través del cálculo analítico inicial y la simulación realizada en las villas objeto de estudio se ha ido desarrollando y validando esta herramienta, realizada en hoja de cálculo excel, que ha servido para profundizar en el diseño de una herramienta de uso fácil y accesible.

Otro punto de interés es que se evitaría el uso de programas excesivamente complejos, costosos y lentos en fase de diseño, agilizando así este proceso y permitiendo una mayor flexibilidad a la hora de incorporar estos elementos en la arquitectura.

Este objetivo se desarrolla de forma detallada en el apartado 2.2.

2. Como un segundo objetivo, se plantea estudiar, analizar y simular los ejemplos más característicos de la considerada Arquitectura Renacentista Pneumática¹¹ con una doble finalidad. Por un lado, para verificar la eficiencia de las soluciones bioclimáticas aplicadas. Por otro, para retomar y poner en valor el saber hacer e ingenio desarrollado y optimizarlo mediante herramientas informáticas y aplicarlo a problemáticas actuales en la edificación.
3. Un tercer objetivo, vinculado con el anterior, ha sido determinar la fiabilidad de los datos extraídos de las distintas simulaciones y modelizaciones realizadas con las tomas de datos realizadas ex-profeso para la investigación.

Para dar respuesta estos dos objetivos complementarios, como se expondrá ampliamente en el apartado 3, se ha procedido a la siguiente metodología:

- Estudio individual de cada una de las villas pneumáticas y sus sistemas de refrigeración pasiva, en lo referente a planimetrías y esquemas de funcionamiento, tanto de sistema como de envolvente de los edificios.
- Simulación analítica de los sistemas enterrados con los que se obtienen unos datos de temperatura, velocidad y flujo de aire a la salida de los mismos. Para esta simulación se han usado las herramientas de cálculo presentadas en los apartados 2.1 y 2.2.
- CFD: Mediante el programa informático Design Builder (www.designbuilder.es) se realiza la modelización de las

¹¹ KENDA, B. Aeolian Winds and the Spirit in Renaissance Architecture.

condiciones de contorno de los edificios a través del motor de cálculo Energy Plus.

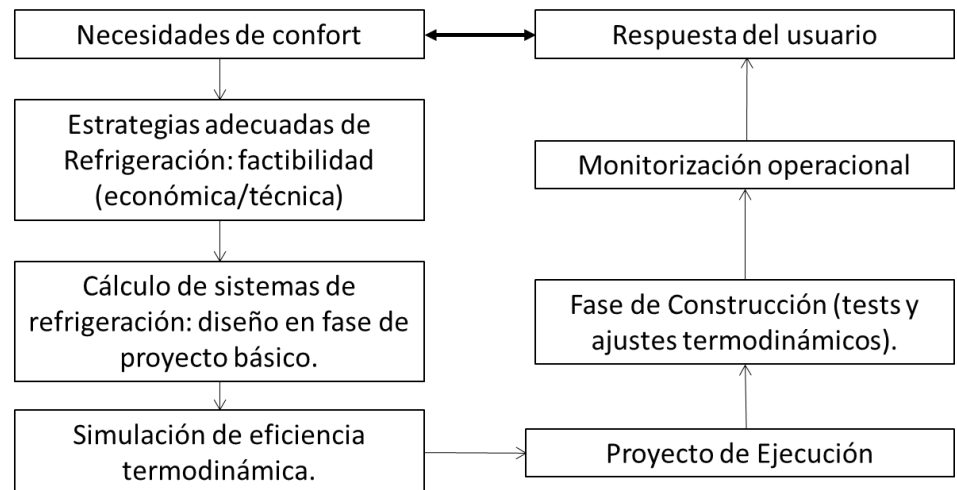
Por último se realiza una modelización fluidodinámica con las condiciones de contorno calculadas a las que se añaden los datos obtenidos en la simulación analítica previa. Los resultados obtenidos han sido cotejados con las diferentes tomas de datos realizadas in situ durante el mes de Agosto de 2012, en los casos en los que esta toma de datos ha sido posible.

4. Como último objetivo del estudio, se plantea definir y modelizar soluciones reales de diseño bioclimático para la problemática concreta en construcciones en climas tropicales, ofreciendo resultados y datos empíricos sobre prácticas realizadas y soluciones eficientes de bajo consumo energético (o casi nulo).

Para el estándar de clima tropical, caracterizado por elevadas temperaturas y humedades relativas, con una curva constante a lo largo del año, se han realizado tres casos prácticos de soluciones bioclimáticas, compuestos por intercambiadores aire-tierra en este caso con grupos de presión para movimiento de aire y por elementos y soluciones de ventilación natural y extracción de aire por convección.

Estos casos prácticos son edificaciones industriales, que actualmente están operativas en distintas localizaciones en Colombia.

El diseño de cada caso práctico ha seguido un proceso de simulación paso a paso, que ha consistido en realizar modelizaciones de distintas soluciones bioclimáticas. Estas soluciones se han ido incluyendo en función de los datos obtenidos por las propias simulaciones. De esta forma, se ha podido analizar paso a paso el



comportamiento de las distintas soluciones y su aportación a la globalidad de la edificación.

Así pues, tomando como base esta metodología de trabajo, se ha planteado como objetivo el identificar la fiabilidad y validez de distintas soluciones bioclimáticas para su aplicación en climas tropicales, así como la combinación de varias de ellas para garantizar el mejor comportamiento de la edificación a nivel de consumo de energía para refrigeración y de confort adaptativo¹².

Este objetivo se desarrolla en el apartado 4. Se ha denominado Aplicaciones prácticas por el intento real de definir un conjunto satisfactorio de soluciones adaptado a un clima cuyas condiciones hacen más compleja la aplicación de una arquitectura bioclimática en base a geotermia.

¹² ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

2 HERRAMIENTAS DE CÁLCULO

2.1 MODELOS DE CÁLCULO ANALÍTICO.

Para el cálculo analítico de los intercambiadores tierra y aire trabajaremos con dos modelos. Uno el desarrollado por Benkert, Hididt y Schöler y otro por Pierre Holmuller.

Para la realización de estos modelos de cálculo serán necesarias las siguientes simplificaciones:

- La difusión de calor longitudinal se considerará despreciable frente a la perpendicular.
- El suelo se considerará homogéneo.
- El tubo se integrará considerando una capa de suelo que incluya la capacidad calorífica del tubo.
- Los conductos se consideran estancos y la temperatura por encima del punto de rocío, de modo que no serán tenidas en cuenta los cambios de calor latentes debidos a las variaciones en los niveles de humedad del aire.

2.1.1 MODELO DE BENKERT, HEDIDT Y SCHÖLER.

La idealización del terreno propuesta nos permite una simplificación muy útil del problema pudiendo considerarse la ecuación para la difusión en el terreno equivalente a la de transferencia de calor por conducción del sólido semi-infinito:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.1$$

Donde:

T = Temperatura del suelo [°C]

t = Tiempo [seg]

x = Profundidad del suelo, medida desde la superficie [m]

α = Difusividad térmica [m²/seg]

Para obtener la temperatura del suelo necesitaríamos por una parte la influencia de la temperatura del aire exterior y por otra la influencia del conducto enterrado.

Para la influencia de la temperatura del aire exterior tomamos la simplificación Baehr-Stephan¹³, según la cual la temperatura en la superficie de la tierra ($x=0$) en el año, respondería a la ecuación:

$$T_{\text{superficial}}(t) = T_m + (T_{\text{max}} - T_m) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0}\right) \quad 2.2$$

Donde:

$T_{\text{superficial}}$ = Temperatura en la superficie de la tierra [$^{\circ}\text{C}$]

T_m = Temperatura media anual del ambiente [$^{\circ}\text{C}$]

T_{max} = Temperatura ambiental máxima anual en [$^{\circ}\text{C}$]

t = Tiempo [s]

t_0 = Duración de un año [s] (1 año $\approx 31,5 \times 10^6$ [s])

t/t_0 = Fracción de año (con t/t_0 igual a cero para la máxima temperatura ambiental)

Finalmente Baehr-Stephan¹⁴, propone como solución para la variación de temperatura de la tierra, en función de la profundidad y del tiempo, con un modelo de sólido semi-infinito y en las condiciones anteriormente descritas, la ecuación:

¹³ BAEHR, H.D.; K. STEPHAN, Wärme-und Stoffübertragung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994 und 1996

¹⁴ id

$$T(x, t) = T_m + (T_{\max} - T_m) \cdot \exp^{-mx} \cos(2\pi \frac{t}{t_0} - mx) \quad 2.3$$

Con:

$$m = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_0}} \quad 2.4$$

Donde:

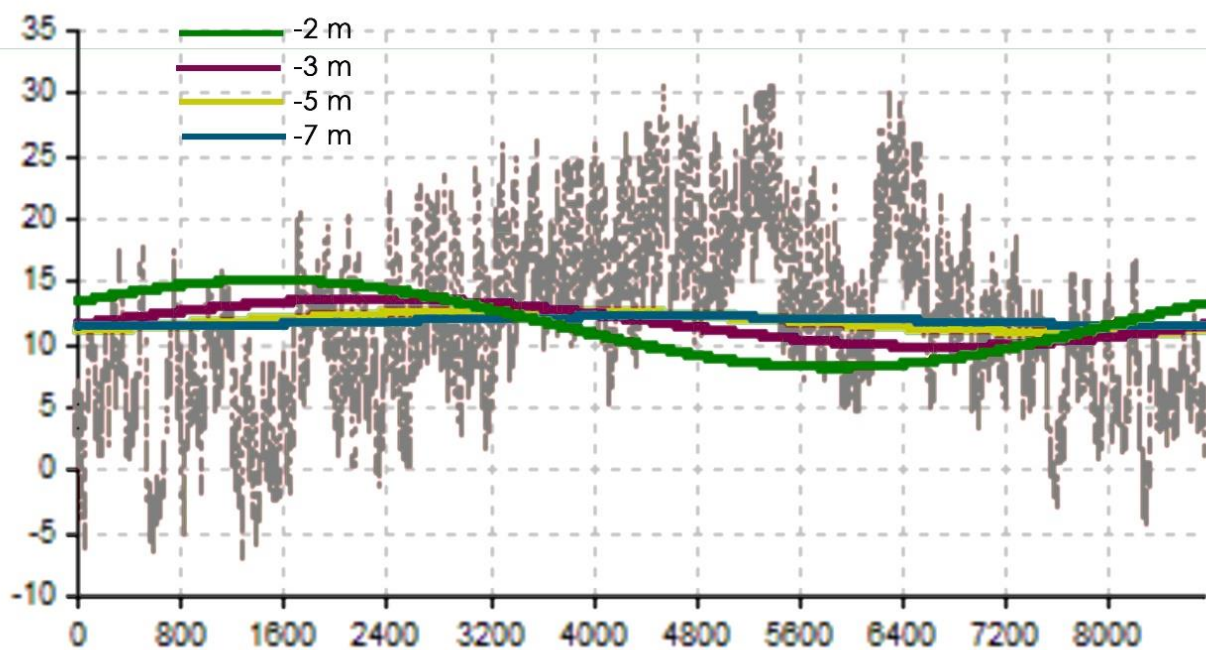
$T(x,t)$ = Temperatura de la tierra en función de la profundidad y del tiempo [°C]

x = Profundidad [m]

α = Difusividad térmica [m²seg]

Con la solución para la temperatura de la tierra en función de la profundidad y del tiempo mostrada en la ecuación, se obtienen varias curvas de temperatura según el periodo, las cuales convergen (disminuyen su amplitud), a medida que aumenta la profundidad (Fig. 2.1).

Fig. 2.1. Temperaturas en función de la Profundidad del terreno. Datos tomados en Nantes (Francia)



Para analizar la influencia del tubo en la temperatura del terreno Benkert, Hediht y Schöler introducen el parámetro B, definido en la ecuación 2.5, y que supone la relación entre ambos efectos. Considerando la conductividad térmica de la tierra y el coeficiente de transferencia de calor entre el flujo de aire y la tierra en la pared del tubo.

$$B = 2\pi \frac{k_s}{U_L} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{S_0}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{S_0}{R_0} \right)^2 - 1} \right)} \quad 2.5$$

Donde:

B = Relación de transferencia de calor, desde la superficie de la tierra al tubo y desde el flujo de aire, a la pared del tubo

k_s = Conductividad térmica del suelo [W/(m K)]

U_L = Coeficiente de transferencia de calor por unidad de longitud de pared del tubo, entre el aire y la pared del tubo [W/(m K)]

S_0 = Profundidad de instalación del tubo [m]

R_0 = Radio del tubo en [m]

El valor B es simplemente una relación de transferencia de calor obtenida con las temperaturas que intervienen en el proceso (temperatura de la tierra a la profundidad de instalación $T_{E,0}$, temperatura de la tierra en la pared del tubo $T_{E,W}$ y temperatura del aire en el interior del tubo $T_{A,P}$). Esta relación se obtiene por equilibrio de transmisión entre el flujo de calor desde la tierra hacia la pared del tubo, o viceversa, y el flujo de calor desde la pared del tubo hacia el aire en su interior, o viceversa. Este equilibrio se muestra en la siguiente ecuación:

$$2\pi \cdot \frac{k_s}{\ln \left(\frac{S_0}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{S_0}{R_0} \right)^2 - 1} \right)} \cdot (T_{E,0} - T_{E,W}) = U_L \cdot (T_{E,W} - T_{A,P}) \quad 2.6$$

Luego:

$$B = \frac{T_{E,W} - T_{A,P}}{T_{E,0} - T_{E,W}} \quad 2.7$$

$T_{E,0}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo, no influenciada por él [°C]

$T_{E,W}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo [°C]

$T_{A,P}$ = Temperatura del aire en el tubo [°C]

El valor B se utilizará como factor de corrección en la ecuación 2.10.

La temperatura de la tierra en la pared del tubo, pero no influenciada por éste ($T_{E,0}$), es calculada con la temperatura media del aire exterior (T_m) y con la temperatura máxima del aire exterior (T_{max}), asumiendo una variación de temperatura sinusoidal a través del año. Además es definido un parámetro adimensional (ξ), el cual describe la “profundidad térmica” del tubo. Esto se resume en la ecuación:

$$T_{E,0}(t) = T_m + (T_{max} - T_m) \cdot \exp^{-\xi} \cos(2\pi \frac{t}{t_0} - \xi) \quad 2.8$$

Donde:

$T_{E,0}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo, no influenciada por él [°C]

ξ = Parámetro adimensional para la “profundidad térmica” del tubo

t = Tiempo [s]

t_0 = Duración de un año [s] (1 año $\approx 31,5 \times 10^6$ [s])

t/t_0 = Fracción de año (con t/t_0 igual a cero para la máxima temperatura ambiental)

La ecuación 2.8, no es más que el modelo de Baehr-Stephan mostrado en la ecuación 2.3, evaluada a la profundidad del tubo.

Esto considerando:

$$\xi = x \cdot m ; \text{ profundidad } x = S_0 ; \text{ difusividad térmica } \alpha = \frac{k_s}{\rho \cdot c}$$

Donde:

$\rho \cdot c$ = Capacidad calórica volumétrica de la tierra [J/(m³K)]

ρ = Densidad de la tierra [kg/m³]

c = Calor específico de la tierra [J/(kg K)]

Con esto la “profundidad térmica” ξ , en la cual se sitúa el intercambiador de calor aire-tierra, depende de la profundidad real en la cual se sitúa el intercambiador junto con las características térmicas de la tierra sobre él. Esto se muestra en la ecuación:

$$\xi = S_0 \sqrt{\frac{\pi \rho c}{t_0 k_s}} \quad 2.9$$

Es necesario aplicar un factor de corrección para representar la influencia del tubo en la temperatura de la tierra en la pared del tubo.

Esto se logra con el factor B definido en la ecuación 2.5. Luego, la temperatura corregida de la tierra en la pared del tubo $T_{E,W}$ esta definida por la ecuación:

$$T_{E,W} = \frac{B \cdot T_{E,0} + T_{A,P}}{B + 1} \quad 2.10$$

Donde:

$T_{E,W}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo [°C]

$T_{A,P}$ = Temperatura del aire en el tubo [°C]

Lo cual significa que $T_{E,W}$ es la media aritmética entre la temperatura de la circulación del aire dentro del tubo ($T_{A,P}$) y la temperatura de la tierra en la pared del tubo no influenciada por el tubo ($T_{E,0}$), considerando la conductividad térmica de la tierra y el coeficiente de transferencia de calor entre el flujo del aire y la tierra en la pared del tubo.

La temperatura del aire exterior ($T_{A,0}$) determina la temperatura a la entrada del intercambiador de calor aire-tierra. Además esta temperatura también se relaciona indirectamente con la temperatura de la tierra, debido a que es la condición de borde (ecuación 2.2) de la solución propuesta por Baehr-Stephan, para la variación de la temperatura de la tierra (ecuación 2.3).

$$T_{A,0}(t) = T_m + (T_{\max} - T_m) \cdot \cos(2\pi \frac{t}{t_0}) \quad 2.11$$

Donde:

$T_{A,0}$ = temperatura del aire exterior en °C en el tiempo t en s

La ecuación 2.11 muestra un perfil de temperatura sinusoidal a través del año para la temperatura del aire ambiente ($T_{A,0}$).

Para calcular el intercambio de calor en el tubo, la longitud total del intercambiador se divide en segmentos iguales. Como los segmentos no varían, el intercambio de calor en el segmento produce un salto de temperatura entre dos segmentos. El intercambio de calor para cada segmento esta definido por la ecuación:

$$\dot{Q}_w = \Delta z \cdot U_L \cdot (T_{E,W} - T_{A,P}) \quad 2.12$$

Donde:

\dot{Q}_w = Flujo de calor, a través de la pared del tubo al aire en él [W]

Δz = Largo del segmento [m]

El coeficiente de transferencia térmica por la longitud de la pared del tubo (U_L), para los tubos de los intercambiadores de calor de aire-tierra, depende solamente del coeficiente de transferencia térmica (h_i) en su superficie interna. En la ecuación 2.13, se aprecia cómo se define el coeficiente de transferencia térmica por la longitud de la pared del tubo (U_L).

$$U_L = 2\pi R_0 h_i \quad 2.13$$

Donde:

h_i = Coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo [W/(m²K)]

El coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo (h_i), depende de características del flujo, de las dimensiones del tubo y de las propiedades del aire en el tubo. Este coeficiente está definido por la ecuación:

$$h_i = \frac{k_A Nu}{2 \cdot R_0} \quad 2.14$$

Donde:

k_A = Conductividad térmica del aire en el tubo [W/(m K)]

Nu = Número de Nusselt del aire en el tubo

El número de Nusselt (Nu) del aire en el tubo, depende del número de Reynolds (Re) y por ende del caudal. Para la circulación de aire turbulento para los intercambiadores de calor aire-tierra, Gnielinski¹⁵ propone la aproximación de la ecuación:

$$Nu = 0,0214 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad 2.15$$

Donde:

Re = Número de Reynolds del aire en el tubo

Pr = Número de Prandtl del aire (típicamente: $Pr = 0,72$)

Ahora la temperatura del aire a través de la longitud total del intercambiador de calor aire-tierra, puede ser calculada. Al comenzar con una temperatura de entrada igual al aire ambiente, la temperatura irá variando gradualmente, es decir, segmento a segmento la temperatura del aire se ajustará según el flujo de calor en el segmento y la capacidad de calor del aire. Este paso esta definido por la ecuación 2.16.

$$\dot{Q}_W = \dot{m}C_p ((T_{A,P})_{out} - (T_{A,P})_{in}) \quad 2.16$$

con:

\dot{m} = Flujo másico de aire [kg/s]

c_p = Calor específico del aire [J/(kg K)]

¹⁵ GNIELINSKI, V. Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen. Forsch. Ing.-Wes., 1975, vol. 41(1), pp. 8-15.

$(T_{A,P})_{in}$ = Temperatura del aire en el tubo a la entrada del segmento [°C]

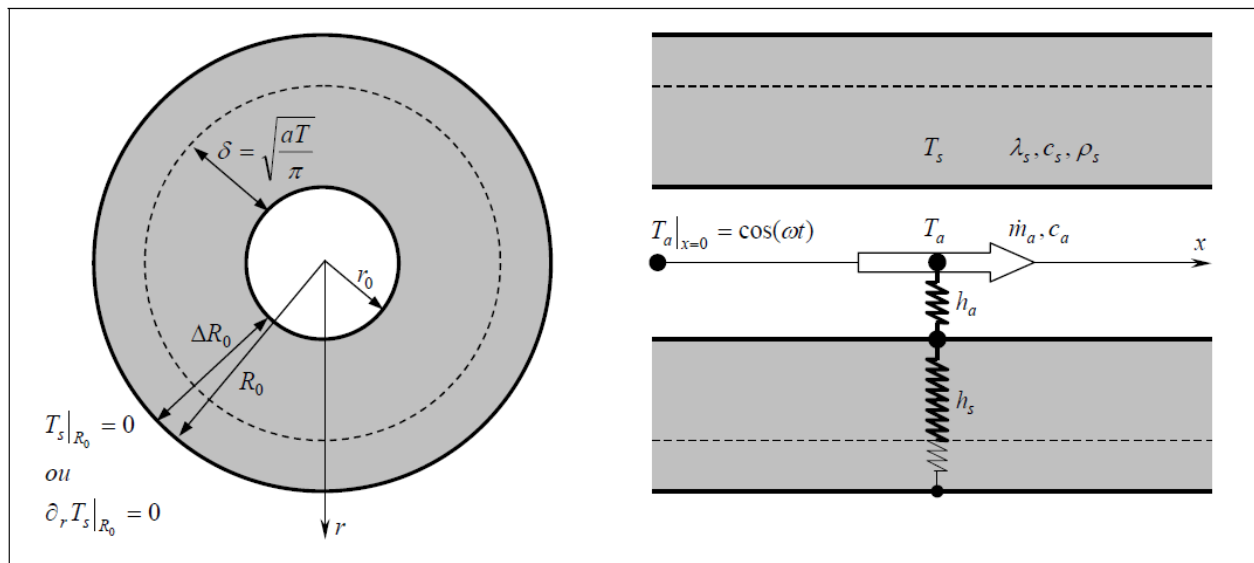
$(T_{A,P})_{out}$ = Temperatura del aire en el tubo a la salida del segmento [°C]

Finalmente la ecuación 2.16 se iguala con la ecuación 2.12. Con esto se despeja la temperatura al final del segmento $(T_{A,P})$, comenzando con la temperatura ambiental del aire a la entrada del segmento. Luego, se repite el procedimiento para el nuevo segmento, pero esta vez considerando como temperatura de entrada, la temperatura obtenida a la salida del tramo anterior. Así, se repetirá este procedimiento hasta llegar a una temperatura tan cercana como se desee de la temperatura del suelo, no influenciada por el tubo y a la profundidad de instalación del tubo. Con esto, se calculará la cantidad de segmentos utilizados y el calor transferido en cada tramo, con lo cual, se tendrá el tramo total de tubo y el calor total transferido.

2.1.2 MODELO DE CALCULO HOLLMULLER

Frente a otros modelos de cálculo analíticos basados en modelos de intercambio de calor en régimen permanente, este modelo tiene en cuenta la difusión térmica del suelo en régimen transitorio, combinando las frecuencias de oscilación térmicas anual y diaria. Esto lo hace particularmente interesante en la aplicación a climas tropicales, en los que resulta imperativo tener en cuenta el diferencial térmico entre el día y la noche.

Para el desarrollo de este modelo de cálculo se parte de la consideración de un flujo de aire (o de cualquier otro fluido) que recorre la longitud de un tubo cilíndrico enterrado en una capa de suelo de espesor finito, con una condición de borde que pudiera ser adiabática o isotérmica. Se considerará también la temperatura del aire a la entrada del mismo como una curva sinusoidal. Con estas premisas se obtiene que la evolución de la



curva de la temperatura a lo largo del conducto depende por un lado de un intercambio convectivo entre el aire y el tubo, y por otro la difusión en el terreno.

En la práctica esta condición de borde adiabático o isotérmico no se daría, ya que las condiciones térmicas del terreno se verían afectadas ya sea por la proximidad de otro conducto enterrado, por la presencia del nivel freático o alguna edificación próxima. No obstante se puede llegar a resultados bastante exactos si el espesor de terreno que consideramos para nuestro cálculo se limita a aquel no influenciado por elementos externos como veremos más adelante.

De este modo, el problema de intercambio térmico a lo largo del conducto se reducirá a un sistema de tres ecuaciones con la difusión térmica en el terreno, el intercambio convectivo aire-tubo y la interacción de ambas a nivel tubo.

Partimos entonces de un radio de difusión térmica en torno a los conductos cuya longitud dependería del período de oscilación térmica:

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda_s \tau}{c_s \rho_s \pi}} \quad 2.17$$

Fig. 2.2. Esquema de principio para el cálculo analítico del intercambio difusivo aire/tierra. Cortes transversal y longitudinal.

Donde la difusividad térmica depende de la conductividad λ_s y la capacidad calorífica del suelo $c_s \rho_s$.

De tal modo que, para un suelo de referencia cuya conductividad térmica sea $\lambda_s : 1,9 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ y su capacidad calorífica $c_s \rho_s : 1,9 \text{ MJ/K}\cdot\text{m}^3$, obtendríamos los siguientes valores para los radios de difusión térmica diario y anual:

$$\delta_{diario} \approx 17 \text{ cm}$$

$$\delta_{anual} \approx 300 \text{ cm}$$

Consideremos ahora la curva sinusoidal correspondiente a las temperaturas de entrada al sistema:

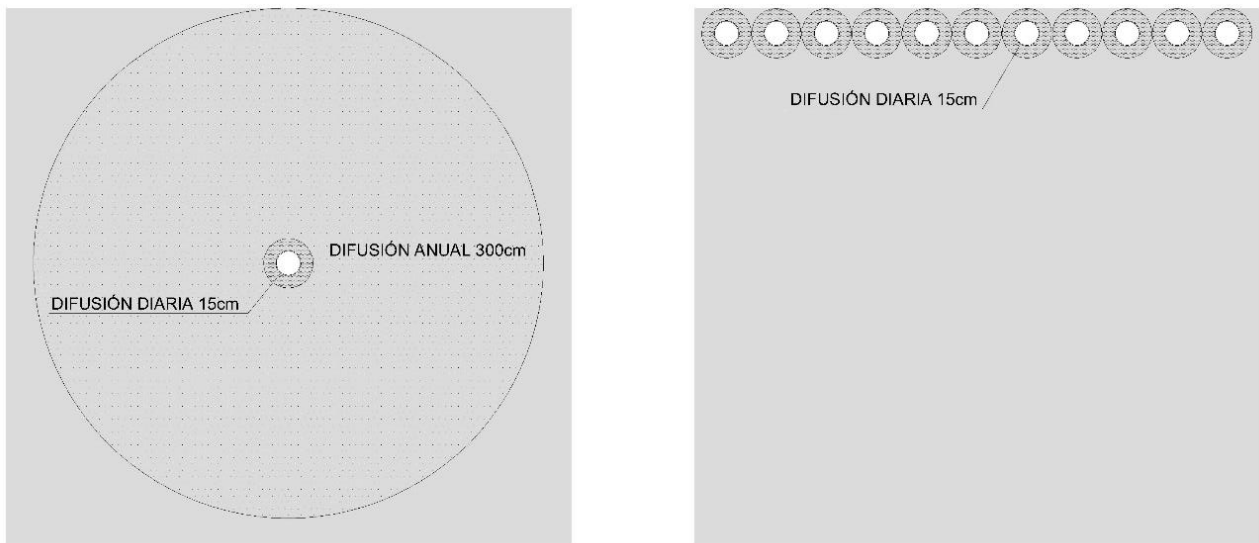
$$T_{ext} = \theta_{ext} \cos(\omega t) \quad 2.18$$

Según Hollmuller la temperatura en la pared del tubo se obtendría mediante la siguiente ecuación:

$$T_{tubo} = \theta_{ext} \exp\left(-\frac{Sh}{cm}\right) \cdot \cos\left(\omega(t - \Delta t_x) - \frac{Sk}{cm}\right) \quad 2.19$$

En la que aparecen una componente de amortiguación térmica definida por el coeficiente h y una componente de desfase térmico definido por el coeficiente k .

Volviendo a los cálculos sobre el suelo de referencia, el modelo Hollmuller, al trabajar con unas condiciones de borde adiabáticas e isotérmicas, nos proporciona unos radios de influencia del intercambio difusivo en el terreno en función del período elegido (si es anual o diario) y del efecto que se desea



priorizar (desfase o amortización), que posteriormente facilitarán la labor de prediseño del sistema¹⁶.

	Diario	Anual
Amortización	R= 15 cm	R= 300 cm
Desfase	R= 3 cm	R= 60 cm

Dado que, frente a la amortiguación, el desfase térmico tiende a carecer de importancia, podemos no tenerlo en cuenta de modo que la ecuación para calcular la temperatura de borde del tubo quedaría:

$$T_{tubo} = \theta_{ext} \exp\left(-\frac{Sh}{cm}\right) \cdot \text{sen}(\omega t)$$

El coeficiente de amortiguación h , depende a su vez de un coeficiente de intercambio convectivo entre el aire y el tubo h_a y de un coeficiente de intercambio difusivo con el terreno h_s .

Fig. 2.3. Radios de difusión en base a las amortizaciones diarias y anuales. Posibilidades de diseño.

¹⁶ Estos datos son aproximados obtenidos de una media obtenida a partir de distintos tipos de terrenos, porosidades y humedades relativas.

$$h \approx \frac{h_a h_s}{h_a + h_s}$$

El coeficiente de intercambio convectivo puede ser definido por la fórmula de Gnielinski:

$$h_a = \frac{\lambda_a}{2r} 0,0214 (Re^{0,8} - 100) Pr^{0,4} \quad (\text{para } Re > 2300)$$

Y el coeficiente de difusión por la siguiente igualdad:

$$h_s \approx \frac{\lambda_s}{R \cdot \ln\left(1 + \frac{\delta}{r}\right)}$$

A partir de estos datos se obtendrían los parámetros de predimensionado que se definen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de predimensionado de intercambiadores tierra/aire.

caudal	m3/h	200			100			50		
velocidad	m/s	1	2	4	1	2	4	1	2	4
radio	cm	13,3	9,4	6,6	9,4	6,6	4,7	6,6	4,7	3,3
ha	W/K.m2	6	9	15	6	9	15	6	9	15
hd diario	W/K.m2	17,6	19,9	22,8	19,9	22,8	26,8	22,8	26,8	31,9
hd anual	W/K.m2	4,4	5,7	7,4	5,7	7,4	9,6	7,4	9,6	12,5
amortización	diaria	$\Delta R_0 = 15 \text{ cm}$								
hs	W/K.m2	14,3	16,8	20,1	16,8	20,1	24,6	20,1	24,6	30,5
ks	W/K.m2	19,6	20,9	22,6	20,9	22,6	24,6	22,6	24,6	27,1
h	W/K.m2	5,1	7,1	10,5	5,1	7,3	10,9	5,2	7,4	11,3
k	W/K.m2	0,9	1,5	2,9	0,8	1,3	2,5	0,7	1,2	2,2
longitud	m	32	33	31	23	23	21	16	16	14
sup. de intercambio	m2 por tubo	27	19	13	13	9	6	7	5	3
caudal/sup. de interc.	m3/h por m2	7,4	10,4	15,3	7,5	10,6	15,9	7,6	10,9	16,6
desfase residual	hora	1,3	1,7	2,1	1,2	1,4	1,8	1	1,2	1,5
amortización	anual	$\Delta R_0 = 300 \text{ cm}$								
hs	W/K.m2	4,8	6,2	8,1	6,2	8,1	10,5	8,1	10,5	13,8
ks	W/K.m2	2,3	2,7	3,1	2,7	3,1	3,7	3,1	3,7	4,5
h	W/K.m2	2,8	3,8	5,4	3,2	4,4	6,4	3,6	5	7,4
k	W/K.m2	0,7	0,9	1,3	0,6	0,8	1,3	0,5	0,8	1,2
longitud	m	58	60	60	36	37	36	23	23	22
sup. de intercambio	m2 por tubo	48	36	25	21	15	11	10	7	5
caudal/sup. de interc.	m3/h por m2	4,1	5,6	7,9	4,7	6,5	9,3	5,2	7,3	10,8
desfase residual	día	28	27	28	22	22	23	18	18	19
desfase	diario	(12 hora $\Delta R_0 = 3 \text{ cm}$)								
hs	W/K.m2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
ks	W/K.m2	4,6	4,8	5,1	4,8	5,1	5,5	5,1	5,5	6
h	W/K.m2	2,2	2	1,6	2,4	2,2	1,9	2,5	2,5	2,2
k	W/K.m2	2,8	3,7	4,5	2,9	3,8	4,7	2,9	3,9	5,1
longitud	m	91	99	115	64	68	77	45	47	51
sup. de intercambio	m2 por tubo	76	59	48	38	29	23	19	14	11
caudal/sup. de interc.	m3/h por m2	2,6	3,4	4,2	2,7	3,5	4,4	2,7	3,6	4,7
amplitud residual	%	8	17	32	7	16	29	6	14	26
desfase	anual	(6 mese: $\Delta R_0 = 60 \text{ cm}$)								
hs	W/K.m2	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
ks	W/K.m2	0,7	0,9	1,2	0,9	1,2	1,7	1,2	1,7	2,3
h	W/K.m2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5
k	W/K.m2	0,7	0,9	1,2	0,9	1,2	1,6	1,2	1,6	2,2
longitud	m	359	393	421	200	214	225	111	116	119
sup. de intercambio	m2 por tubo	300	232	176	118	90	66	46	34	25
caudal/sup. de interc.	m3/h por m2	0,7	0,9	1,1	0,8	1,1	1,5	1,1	1,5	2
amplitud residual	%	57	59	62	50	52	55	42	44	47

2.2 FORMULACIÓN DE INTERCAMBIADORES ENTERRADOS POR CONVECCIÓN NATURAL (IECN)

En la mayor parte de los casos el uso de sistemas de intercambiadores tierra-aire viene acompañado de un grupo de presión que garantiza la circulación del aire a través del sistema enterrado. En esta situación la velocidad del aire sería un factor conocido o, al menos, previsible.

Para aquellas situaciones en las que dicho sistema de circulación no existe, y el movimiento de aire se realiza por diferencial térmico, la velocidad del aire en los tubos se convierte en una incógnita. Dado que el número de Reynolds depende de la velocidad del aire en el tubo, y este valor es necesario para el cálculo de la temperatura al final de los conductos, necesitamos introducir un valor para la misma.

Propondremos entonces una simplificación que permita un predimensionado del sistema desde un punto de vista más desfavorable.

El intercambio térmico entre los conductos disminuye a medida que la velocidad del aire a través de los mismos aumenta. Por lo que el mínimo intercambio se producirá cuando la velocidad sea la máxima posible.

Por otra parte consideraremos que el movimiento del aire vendrá provocado exclusivamente por la diferencia de densidad provocada por el cambio de temperatura y la diferencia de cota entre la entrada y la salida del conducto.

Aplicaremos Bernoulli para un sistema ideal en régimen laminar y en el que despreciaremos el efecto de la pérdida de caudal a lo largo del conducto.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = cte \quad 2.20$$

donde:

V = velocidad del fluido en conducto.

ρ = densidad del fluido.

P = presión a lo largo de la línea de corriente.

g = aceleración gravitatoria

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

Por lo que:

$$\frac{V_0^2 \rho_0}{2} + P_0 + \rho_0 g z_0 = \frac{V_i^2 \rho_i}{2} + P_i + \rho_i g z_i \quad 2.21$$

Partimos de un estado inicial en el aire estaría en reposo, luego:

$$P_0 + \rho_0 g z_0 = P_i + \rho_i g z_i \quad 2.22$$

Considerando el cambio de presión viene provocado por el cambio de densidad y por lo tanto de temperatura,

$$\rho = \frac{P}{R_m \cdot T} \quad 2.23$$

Donde

R_m = sería la constante universal de los gases entre la masa molecular

Luego,

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \frac{p_0}{R_m \cdot T_0} \\ \rho_1 &= \frac{p_1}{R_m \cdot T_1}\end{aligned}\tag{2.24}$$

Si suponemos que la diferencia de presiones entre los distintos estado del gas es muy pequeña ($p_0 \approx p_1$)

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{T_0}{T_1}\tag{2.25}$$

Volviendo a la ecuación 2.21

$$\Delta p = (\rho_0 - \rho_1) g \cdot h = \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \cdot g \cdot h\tag{2.26}$$

Dado que esta diferencia de presiones es la que genera la presión dinámica

$$q = \frac{V^2 \rho}{2} = \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \cdot g \cdot h\tag{2.27}$$

Entonces

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \left|1 - \frac{T_0}{T_1}\right|}\tag{2.28}$$

Donde

si $\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) < 0$ el movimiento del aire se producirán en el sentido inverso al considerado inicialmente del conducto

De la ecuación 2.28 se deduce que, para igual valor de h , cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas más alto será el valor de la velocidad. Por lo que, volviendo al punto de partida en el que necesitábamos que la velocidad del aire fuera máxima para que las condiciones de predimensionado fueran las más desfavorables, para alcanzar esa velocidad máxima necesitaríamos un ΔT máximo.

$$\Delta T_{\max} \rightarrow V_{\max}$$

La máxima diferencia de temperatura que se puede conseguir a través del conducto enterrado sería la de la temperatura exterior y la del terreno.

Por lo que

$$V_{CAL} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \left| 1 - \frac{T_{EXT}}{T_{TER}} \right|} \quad 2.29$$

Donde:

V_{CAL} = Velocidad de cálculo (m/s)

T_{EXT} = Temperatura exterior de bulbo seco (K)

T_{TER} = Temperatura del terreno (K)

h = Diferencia de altura entre la entrada y salida del conducto (m)

De este modo tendríamos un valor de velocidad con el que podríamos obtener un número de Reynolds que nos permita iniciar un cálculo de intercambio de calor entre el aire y el terreno, obteniendo así unas temperaturas iniciales de salida.

Una vez calculadas las temperaturas a la salida del sistema que hemos predimensionado podríamos volver a la ecuación 2.29, para así obtener unas velocidades a la salida del sistema más acordes con la realidad. Cuantas más iteraciones realicemos más nos aproximaremos a los resultados reales.

2.3 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN-VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

Para esta investigación, y con el fin de justificar los resultados obtenidos, se han empleado otras herramientas de simulación.

Por una parte dentro del software Design Builder se ha empleado el motor de cálculo Energy plus para obtener resultados de transferencia de calor a través de la envolvente de los edificios así como la ventilación natural y la infiltración a través de los huecos de los mismos.

Finalmente, con la totalidad de datos obtenidos se han realizado simulaciones Fluidodinámicas con el fin de visualizar la incidencia de los sistemas de climatización enterrados combinados dentro de la globalidad de la ventilación natural en los distintos edificios.

3 REFRIGERACIÓN PASIVA EN EL RENACIMIENTO. ESTUDIO DE LAS VILLAS PNEUMÁTICAS DEL VENETO.

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO: EL AIRE EN LA ARQUITECTURA DEL RENACIMIENTO

Los ejemplos más característicos de la arquitectura renacentista pneumática son las villas de Costozza en el Véneto junto con la Villa Rotonda de Andrea Palladio y la Villa Rocca Pisana de Vincenzo Scamozzi.

El inicio de estas soluciones arquitectónicas se remontaría a las villas de Costozza, siendo el principal exponente de las mismas la Villa Eolia y posterior fuente de inspiración para Palladio y Scamozzi

En numerosos poemas y textos se consideran las cuevas de Costozza, en las colinas del Berici, como representaciones del cosmos y fuentes de inspiración poética¹⁷. El mundo subterráneo es considerado como la continuidad cósmica entre Dios y el hombre, fue glorificado por poetas, monjes Benedictinos y celebrado por numerosos humanistas en el Renacimiento. Estos poetas y estudiosos observaron que las cuevas eran un lugar de revelación divina, un punto de visión cósmica y una maravilla en la que "los vientos se originan, fluyen como el agua y generan aire fresco."¹⁸

¹⁷ El territorio que rodea la ciudad de Costozza se encuentra horadado en una serie de cuevas y túneles excavados por el hombre desde tiempos del Imperio Romano para la extracción de la piedra.

¹⁸ BARBARANO, Libro VI, p. 137, 1762

Así como las cuevas han servido de base literal para las villas, el pneuma de estas cuevas se convirtió en la base espiritual de los arquitectos del Renacimiento en Costozza. Las villas de Trento-Buoni Fanciulli, Trento-Carli, Eolia, Trento-da Schio, Ca'Molina-da Schio y Garzadori da Schio están vinculadas a cuevas subterráneas y canalizaciones de aire que circulan pneuma entre sus pasillos, convirtiéndolas en edificios dotados de alma o *ville spiritali*.

Estas villas de neumáticas fueron elogiadas por Palladio y Scamozzi, y, Francesco Barbarano, sacerdote e historiador del siglo XVIII, las describe como "lugar muy agradable ya que durante el calor del verano, un fresco y suave viento de las cuevas fluye a través de ciertos canales... Las habitaciones recién ventiladas proporcionan un confort equivalente al de un Paraíso Terrenal".¹⁹

En el siglo XVI, pneuma se considera una condición fundamental para establecer la armonía entre el cuerpo humano, la arquitectura y el universo. Así, uno de los objetivos principales de los arquitectos del Renacimiento era aumentar el vigor de aire, el viento y el espíritu vital y por lo tanto el estado físico y espiritual de los habitantes. La idea de un edificio consagrado por el aire, el espíritu vital y el alma es crucial para los arquitectos de las villas neumáticas en Costozza

La arquitectura renacentista neumática se basa principalmente en los escritos de Hipócrates (siglo V a. C) que asocian el pneuma a la respiración, y que se basan en axiomas médicos aplicados a la arquitectura, especialmente aquellos que abogan por climas saludables, espacios y edificios ventilados naturalmente, previstos para restaurar el estado físico y mental del cuerpo humano. De hecho, la práctica de las villas del Renacimiento está influenciada en gran medida por las

¹⁹ Ibid. 18

teorías de Hipócrates, cuyos tratados *Aires, Aguas y Lugares* se difundió ampliamente, y cuyos descubrimientos en pneuma, tanto dentro como fuera del cuerpo humano eran muy respetados en el humanismo.

Las ciudades que están expuestas a los vientos fríos que soplan entre los puntos de puesta y salida del sol en verano, en tales ciudades, que tienen esos vientos como habituales y están al amparo del viento del Sur y de los vientos calientes, ocurre como sigue. En primer lugar, las aguas son, por lo común, duras, frías y dulces. Los habitantes son, por fuerza, vigorosos y flacos, y, en su mayoría, tienen la cavidad inferior cruda y seca, pero la superior les fluye mejor. Son más biliosos que flemáticos. Tienen la cabeza sana y dura, y están expuestos, generalmente, a roturas internas.

Las que están orientadas hacia la salida del sol son, como es natural, más sanas que las que miran hacia el Norte y que las orientadas hacia los vientos calientes, aunque sólo haya un estadio de separación entre ellas. Pues, en primer lugar, el calor y el frío son más moderados, y, además, todas las aguas orientadas hacia la salida del sol son, por fuerza, claras, de olor agradable y blandas. No se produce niebla en esa ciudad, pues lo impide el sol, cuando se levanta y resplandece. Efectivamente, por la mañana domina aquél por lo general. Los habitantes, por su aspecto, gozan de buen color y vigor, más que en cualquier otro sitio, si no lo impide alguna enfermedad. Tienen la voz clara y son mejores en actitud e inteligencia que los orientados hacia el Norte, del mismo modo que

son también mejores los demás seres que nacen en este lugar. La ciudad así orientada se parece muchísimo a la primavera por la moderación del calor y del frío. Las enfermedades son menos numerosas y más flojas y se parecen a las que sobrevienen en las ciudades orientadas hacia los vientos calientes. Las mujeres son allí muy fecundas y dan a luz con facilidad. Tal sucede por lo que respecta a las ciudades anteriores. Las que están mirando hacia la puesta del sol, a cubierto de los vientos que soplan desde el Oriente, e, incluso, de los vientos calientes y los fríos, procedentes del Norte, pasan de largo por ellas, esas ciudades están, por fuerza, en una posición muy malsana. Pues, en primer lugar, sus aguas no son claras. La razón de ello es que por la mañana predomina generalmente, la niebla, que, al mezclarse con el agua, le quita la transparencia, pues el sol no brilla antes de haberse elevado a lo alto.

En verano soplan por la mañana brisas frescas y cae rocío, y, durante el resto del día, el sol, en su marcha hacia la puesta, abrasa especialmente a las personas. Por ello, como es natural, son éstas de mal color y débiles; participan de todas las enfermedades mencionadas, sin que ninguna les esté especialmente reservada. Como cabe esperar, tienen la voz grave y ronca a consecuencia del aire que es en general, impuro y malsano. En efecto, ni siquiera es limpiado del todo por los vientos del Norte, pues estos vientos no se acercan. Y los que se acercan a esas

*ciudades y allí dominan son muy húmedos, pues
lo son los vientos de Occidente.*²⁰

Las teorías de Hipócrates en relación a la influencia de los ambientes en el cuerpo humano así como su afirmación de que "toda enfermedad es causada por el pneuma" han sido fundamentales para la creación de las villas terapéuticas y se hace referencia a ellas en numerosos tratados de arquitectura de los siglos XVI y XVII.

La transmisión de la tradición hipocrática de la época del Renacimiento se debe en gran medida a la escuela pneumática en Roma – Ateneo, Chrysippus, Herodoto, Archigenes, etc - y, sobre todo, Galeno (siglo II) que escribió un comentario en *Aires, Aguas y Lugares* y que amplió las observaciones sobre el clima, el aire y el viento, así como su relación con la vivienda y formas de vida.

En su *De Architectura*, el único tratado de arquitectura antigua que se conserva, Vitruvio sigue el consejo de Hipócrates, al examinar los aspectos médicos del pneuma. En el Libro I, Capítulo IV, sobre la salubridad de los espacios, Vitruvio repite ciertos pasajes del *Aires, Aguas y Lugares* de Hipócrates, en particular aquellos que se refieren a la influencia de los efectos climáticos sobre el cuerpo humano. En el libro I, el capítulo VI, de la planificación urbanística, Vitruvio calcula y representa gráficamente su propia rosa de los vientos octogonal, inspirada en la Torre de los Vientos octogonal construida en Atenas por Andrónico de Cyrre alrededor del siglo II a.C. el diagrama determinaba el trazado de las calles de tal manera que los vientos violentos se disipaban .

²⁰ HIPÓCRATES, *Aires, Aguas y Lugares*.

Porque si son fríos, son desagradables; si son calientes, infectan, si son húmedos, son perjudiciales...²¹

El conde Francesco Trento no sólo fue un reconocido humanista, sino que además participó en el diseño de sus villas en Costozza.²² De hecho en muchos textos históricos, se le conoce como el constructor de un complejo sistema de canales subterráneos de viento para proporcionar ventilación natural a sus edificios. Desde la Cueva de los Vientos, el aire es conducido a través de un canal de gran tamaño hacia la cripta de villa Eolia, desde allí pasaba a la sala superior a través de una rejilla octogonal. Del mismo modo, Villa Trento - Carli se conecta a la Cueva de los Vientos a través de un conducto y una serie de rejillas en el suelo así como por un gran túnel que desemboca directamente en una de las salas. Los sistemas naturales de aire acondicionado más sofisticados fueron ejecutados inicialmente en Trento Buoni Fanciulli. La villa no sólo estaba conectada a conductos de aire enterrados, sino que además tenía respiraderos verticales instalados en los cerramientos.

Andrea Palladio, en su tratado "Los Cuatro Libros de Arquitectura", describe las villas de Costozza como maravillosos dispositivos arquitectónicos y se refirió al "excelente señor Francesco Trento" que inventó "la cárcel de los vientos" llamada Eolia.

Los antiguos acostumbraban a calentar sus habitaciones de esta manera. Se construían chimeneas centrales con columnas, o ménsulas, hasta la altura de los dinteles, sobre los cuales

²¹ VITRUVIO POLION, M.L., Los diez libros de la Arquitectura, Libro I, Capítulo IV, La Salubridad de los Elementos.

²² DA SCHIO, F.T., Storia Genealogica delle Famiglie Nobili Vicentine. Biblioteca Bertoliana Vicenza.

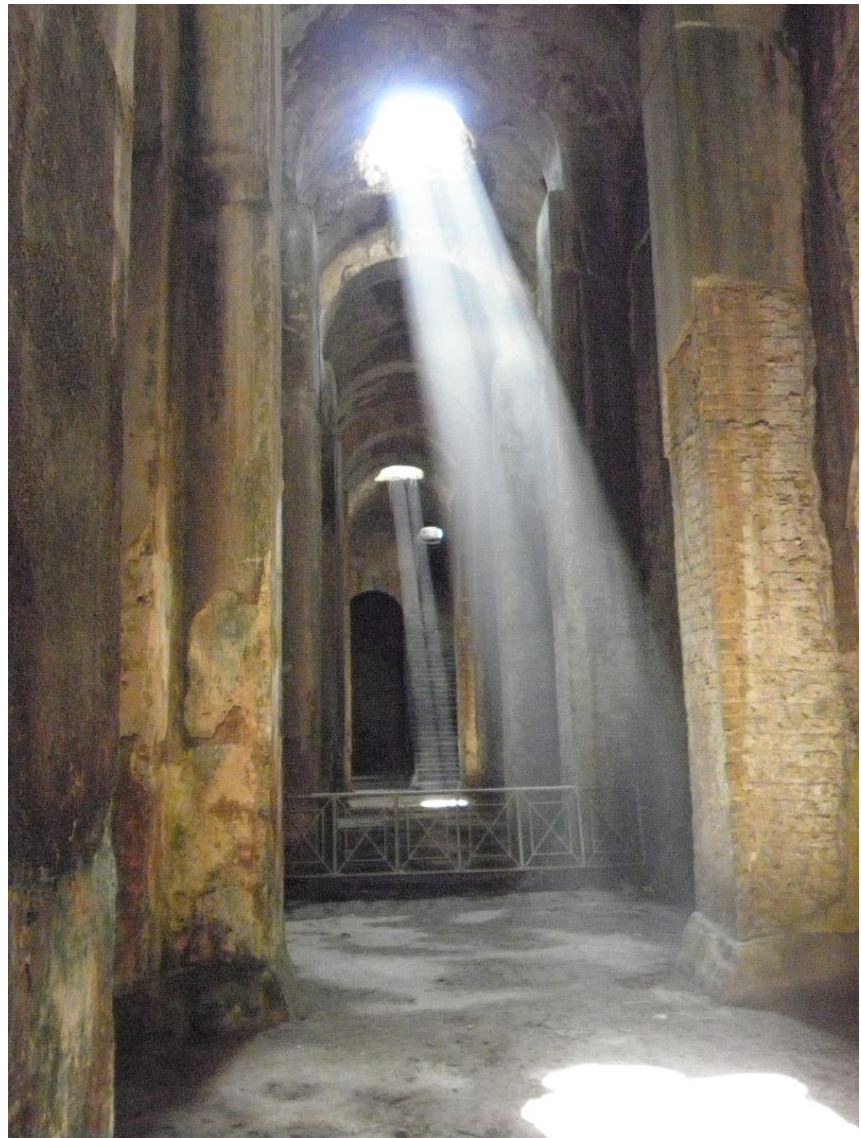


Fig. 3.1. Piscinas de Nerón en Baie.

comenzaba la campana de la chimenea, de donde salía el humo, como se ve uno (ejemplo) en Baie en las piscinas de Nerón²³ y uno no muy lejano de Civitavecchia. Y cuando no se realizaban chimeneas, se hacían en el espesor de los muros algunos conductos, o trompas, a través de los cuales el calor del fuego, que se encontraba en esa habitación salía y se expulsaba a través de ciertas rejillas o embocaduras, realizadas al final de aquellos conductos. Casi del mismo modo Trento,

²³ Ver figura Fig. 3.1

caballero Vicentino en Costozza, en sus Villas refrescaba durante el verano las habitaciones, porque también en los montes donde se encontraban dichas villas había unas cuevas enormes, que los habitantes del lugar llamaban Covali y que eran antiguas canteras, y de las cuales Vitruvio, cuando en su segundo libro se refiere a la piedra, dice que en la Marca Trivigiana se excava un tipo de piedra que se talla con una sierra, como la madera. De las cuales nacen algunos vientos fresquísimos, este Caballero mediante ciertas bóvedas subterráneas llamadas Ventidotti, que conducían sus hogares, y con conductos similares a los mencionados anteriormente, llevaba ese viento fresco a todas las habitaciones, abriéndolos y cerrando permitiendo llevar más no menos frescor según las estaciones. Y, por si fuera poca esta grandísima comodidad para hacer de éste un lugar maravilloso, mucho más digno de ser disfrutado y visto lo hace la Cárcel de los Vientos, que es una habitación enterrada, construida por el Excelentísimo Señor Francesco Trento, a la cual él llama Eolia, y a la que desembocan algunos de los Ventidotti mencionados, en la que para hacerla adornada y bella, en honor a su nombre, él no ha escatimado ni en diligencia ni en riqueza.

Más tarde, Vincenzo Scamozzi, igualmente impresionado en su "L'Idea dell'Architettura Universale"... de las cuevas de la montaña exhalan los vientos que han hecho famosa desde la antigüedad a Costozza. Estos vientos circulan a través de ciertos canales, llamados Ventidottis, para enfriar las

habitaciones y crear un ambiente agradable durante el verano."

Pero, que de las entrañas de la tierra, de las cavernas de los montes se exhalen los vientos, cual auténticos ventiladores, en muchos lugares antiguos. Es así como ocurre en las famosas cuevas de Costozza, que quiere decir Custodia, y de Brendola en el Vicentino, que, habiendo sido una grandísima cantera en aquel tiempo, esto se ha convertido en una ventaja hoy día, ya que ha permitido el trazado de algunos conductos llamados Ventidotti que permitían refrescar las estancias, para un mayor deleite en tiempo estival. En algunas ocasiones de las cavernas de los montes que se encuentran tras de Sienna y Volterra, surgen en algunas estaciones del año vientos tan fuertes y violentos, capaces de romper y esparcir las ramas de los árboles, a veces incluso capaz de arrancarlos de la tierra y transportarlos de un lugar a otro maravillosamente.²⁴

²⁴ SCAMOZZI, V. 1552-1616 L'idea della architettura universale. [Bologna] Arnaldo Forni 1982



VSARONO gli Antichi di scaldare le loro stanze in questo modo. Faceuano i camini nel mezzo con colonne, ò modiglioni, che toglieuan fuo gli Architraui: sopra i quali era la Piramide del camino, d'onde uscìua il fumo, come sene vedeua vno à Baie appresso la Piscina di Nerone; & vno non molto lontano da Ciuità Vecchia. E quando non ui uoleuano camini; faceuano nella grossezza del muro alcune canne, ò trombe per le quali il calor del fuoco, ch'era sotto quelle stanze uscìua, & uscìua fuori per certi spiragli, ò bocche fatte nella sommità di quelle canne. Quasi nell'istesso modo i Trenti Gentil'huomini Vicentini à Costoza lor Villa rinfrescano l'Estate le stanze: Percioche essendo ne i monti di detta Villa, alcune caue grandissime, che gli habitatori di quei luoghi chiamano couali, & erano anticamente Petraie, delle quali credo che intenda Vitruuio, quando nel secondo libro, oue tratta delle pietre, dice, che nella Marca Triuigiana si caua vna sorte di pietra, che si taglia con la fega, come il legno, Nelle quali nascono alcuni venti freschissimi; questi Gentil'huomini per certi volti sotterranei, ch'essi dimandano Ventidotti; gli conducono alle loro case, & con canne simili alle sopradette conducono poi quel uento fresco per tutte le stanze, otturandole, & aprendole à lor piacere per pigliare più, e manco fresco, secondo le stagioni. E benchè per questa grandissima commodità sia questo luogo marauiglioso; nondimeno molto più degno di esser goduto, & visto lo rende il carcere de' Venti, che è vna stanza sotterra fatta dall'Eccellentissimo Signor Francesco Trento, & da lui chiamata EOLIA: oue molti di detti Ventidotti sboccano: nella quale per fare che sia ornata, e bella, e conforme al nome; egli non ha sparagnato nè à diligenza, nè à spesa alcuna. Ma ritornando à i camini; noi li facciamo nella grossezza de i muri, & alziamo le loro canne fin fuori del tetto: acciò che portino il fumo nell'Aria. Doue si deue auertire che le canne non si facciano nè troppo larghe, nè troppo strette: perche se si faranno larghe, uagando per quelle l'Aria; caccierà il fumo all'in giù, e non lo lascerà ascendere, & uscir fuori liberamente: e nelle troppo strette il fumo non hauendo libera uscita; s'ingorgherà, e tornerà indietro: però ne' camini per le stanze non si faranno le canne nè me no larghe di mezzo piede, nè più di noue oncie, e lunghe due piedi e mezzo: e la bocca della Piramide doue si congiugne con la canna si farà alquanto più stretta: acciò che ritornando il fumo in giù; troui quell'impedimento, e non possa uenir nella stanza. Fanno alcuni le canne torte, acciò che per quella tortuosità, e per lo fuoco che lo spigne in fuo; non possa il fumo tornare indietro. I fumaruoli, cioè i buchi per doue ha da uscire il fumo; deono essere larghi, e lontani da ogni materia atta ad abbruciarfi. Le Nappe, sopra le quali si fa la Piramide del camino; deono esser lauorate delicatissimamente, & in tutto lontane dal Rustico: percioche l'opera rustica non si conuiene, se non à molto grandi Edificij per le ragioni già dette.

Fig. 3.2. Inscripción sobre la fachada de Villa Eolia en la que se menciona la estancia de Galileo Galilei en la Villa.

Fig. 3.3. Texto de Palladio referido a las Villas de Costozza.

3.2 CONTEXTO GEOGRÁFICO: CLIMA Y GEOLOGÍA.

3.2.1 CLIMA

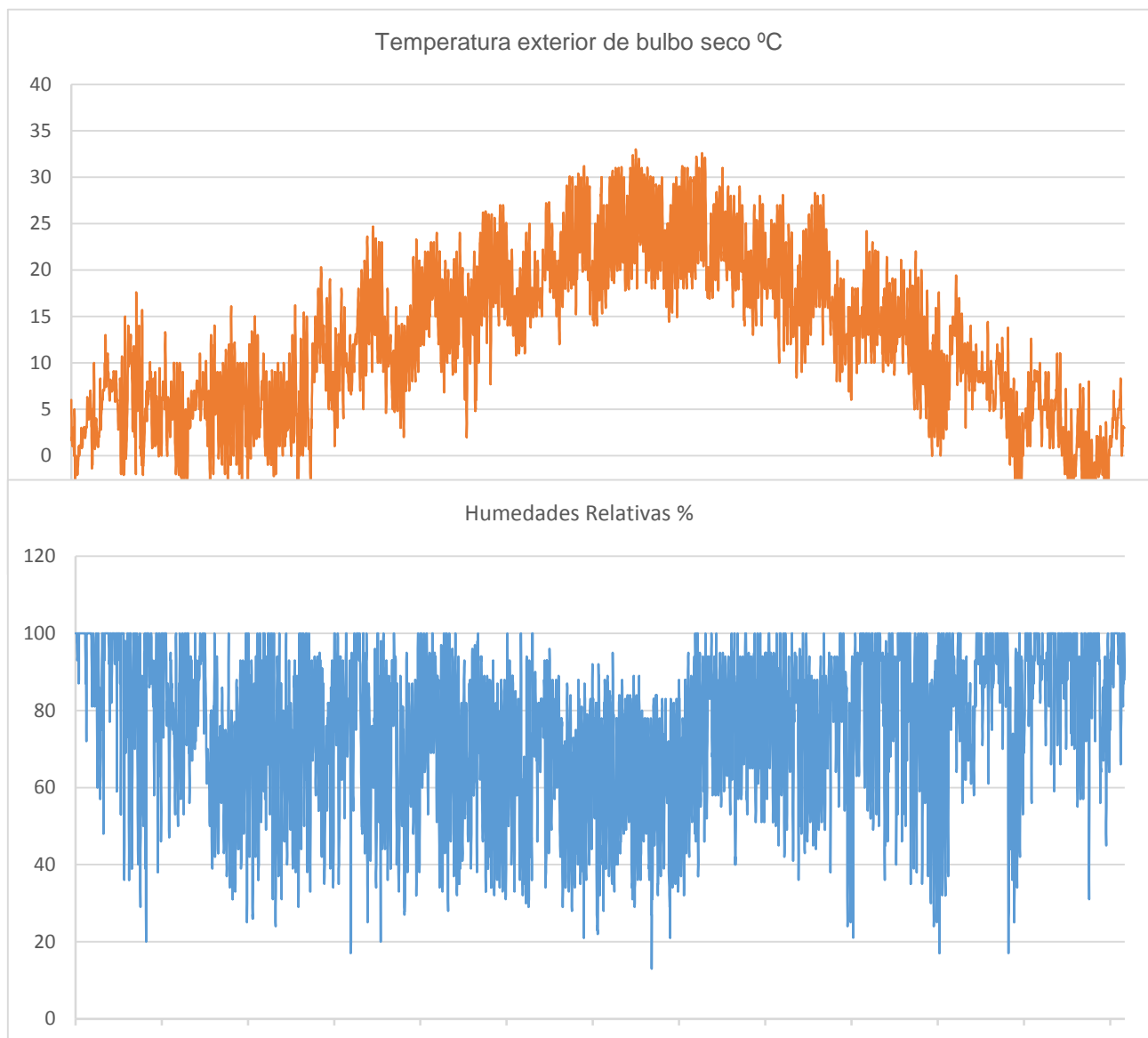
El clima en la región Vicentina se correspondería con la clasificación Koppen Cfa.

Este clima se caracteriza porque la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C y superior a -3 °C y la del mes más cálido supera los 22°C.

Las precipitaciones exceden a la evaporación. Las lluvias están repartidas a lo largo del año por lo que no hay una estación seca.

Fig. 3.4 Vicenza. Temperatura Exterior Seca anual. Datos horarios.

Fig. 3.5 Humedades relativas anuales en Vicenza, datos horarios.



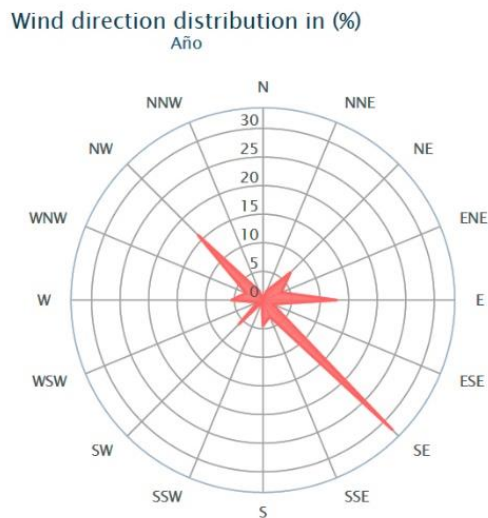


Fig. 3.6. Rosa de vientos predominantes de la región de Vicenza.

Los vientos predominantes en la región serán de dirección Sureste tal como se muestra en la Fig. 3.6.

GEOLOGÍA

La composición principal de los suelos de la región en torno a Vicenza es una Roca Caliza muy blanda por lo que las características termofísicas con las que trabajaremos serán las siguientes.

Densidad (ρ)= 1590 kg/m³

Conductividad térmica (λ)= 0,85 W/mK

Calor específico (C_p)= 1000 J/kgK

factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ)= 20 (adimensional)

A partir de las características del terreno y de los datos climáticos del sitio procederemos a calcular las temperaturas del terreno en función de la profundidad aplicando la ecuación 2.3. Se realiza el cálculo mediante el modelo de Benkert, Hedidt

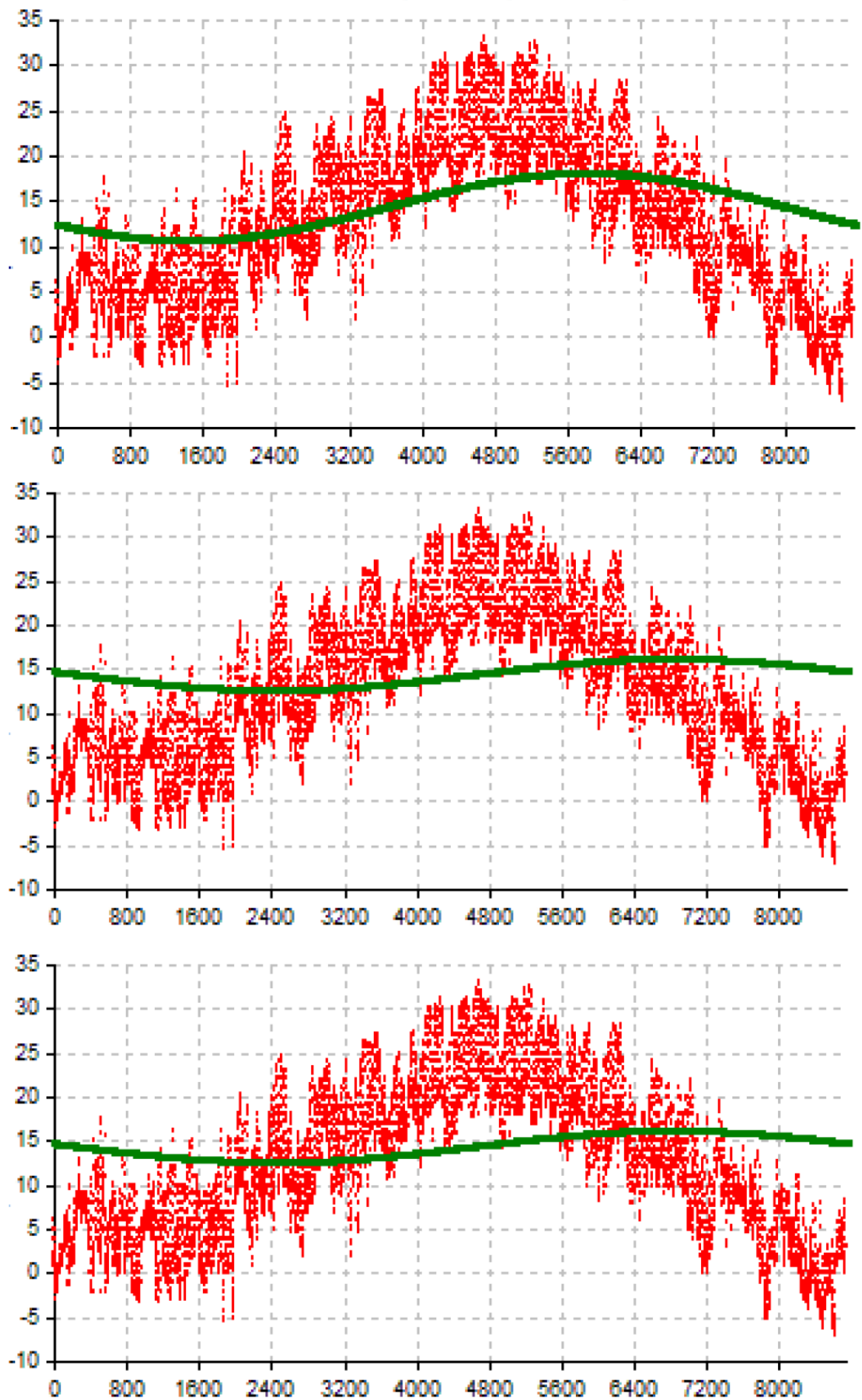
En la pagina siguiente→

Fig. 3.7 Temperatura del suelo a un metro de profundidad a lo largo del año. Datos horarios.

Fig. 3.8. Temperatura del suelo a dos metros de profundidad a lo largo del año. Datos horarios.

Fig. 3.9. Temperatura del suelo a cuatro metros de profundidad a lo largo del año. Datos horarios.

y Schöler para profundidades de uno, dos y cuatro metros obteniéndose los resultados que se muestran a continuación.



3.3 ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO DE LAS VILLAS, SIMULACIONES Y MEDICIONES

A continuación procederemos al estudio individual de cada una de las villas neumáticas y sus sistemas de refrigeración pasiva. Como ya mencionamos anteriormente vamos a aplicar la siguiente metodología de trabajo:

1. Análisis.- Se analizan planimetrías y esquemas de funcionamiento, tanto del sistema en sí como de la envolvente de los edificios.
2. Simulación Analítica.- Con el fin de evaluar la eficiencia de cada una de las soluciones aplicadas se realizará, en primer lugar una simulación analítica de los sistemas enterrados con la que se obtendrán unos datos de temperatura, velocidad y flujo de aire a la salida de los mismos.
3. Condiciones de contorno.- Mediante el programa Design Builder modelizaremos las condiciones de contorno de los distintos edificios a través del motor de cálculo Energy Plus, las condiciones climáticas que tomaremos para todos los casos a efectos de temperaturas de bulbo seco y de humedad relativa serán las de Vicenza, cuyos datos se obtienen del Italian Climatic data collection "Gianni De Giorgio" (IGDG)²⁵. Sin embargo, a efectos de radiación se utilizarán las coordenadas específicas de cada caso.
4. CFD.- A continuación pasaremos a realizar la modelización CFD con las condiciones de contorno calculadas a las que añadiremos, como una condición de contorno más, los datos obtenidos en la simulación analítica. Esta modelización nos permitirá el estudio

²⁵ Desarrollado para ser usado en simulaciones de energías renovables, se basa en un periodo de estudio desde el año 1951-1970. Los datos fueron elaborados por el Professor Livio Mazzearella, Politecnico di Milano.

detallado de los flujos de aire para las distintas circunstancias del edificio.

Para los resultados se utilizará una escala uniforme de valores para todas las simulaciones que nos permita comparar unos edificios con otros.

5. Comparación de resultados.- Finalmente, en los casos en los que se pudieron realizar mediciones in situ, podremos contrastar los resultados obtenidos con las mismas.

Los ejemplos que se analizaran podrían catalogarse en función de tres grupos en base a las soluciones de intercambio térmico con el suelo que presentan:

- Villas conectadas a Ventidotti.
- Villas conectadas a Còvoli.
- Villas con sótanos como intercambiadores térmicos con el terreno.

Esta catalogación en base al intercambio con el terreno será la que usaremos de guía para nuestro análisis.

Además, cada una de las villas responderá a un sistema distinto de expulsión de aire caliente así como de dispositivos de distribución interior presentando distintas alternativas. Siendo éstas en el caso de la distribución:

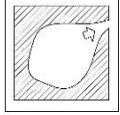
- Rosettas de ventilación.
- Conducción vertical en muros.

Y en el caso de la extracción de aire:

- Ventilación cruzada.
- Óculo en cubierta.
- Linterna en cubierta.

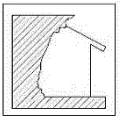
A continuación pasamos a detallar estos sistemas en unos cuadros resumen.

SISTEMAS ENTERRADOS DE REFRIGERACIÓN DEL AIRE DE INYECCIÓN

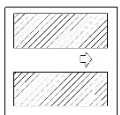


COVOLI

La villa está conectada directamente con grutas naturales rocosas. El aire refrigerado proviene directamente del interior de las mismas.

SÓTANO o
SEMIENTERRADA

La villa tiene un sótano o está parcialmente enterrada. El aire del sótano a menor temperatura es impulsado al resto del edificio. En algunos caso se aprovecha también la inercia térmica de los cerramientos en contacto con el terreno, tal es el caso del villino Garzadori.

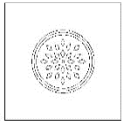


VENTIDOTTI

Conducto excavado en el terreno de manera artificial para conducir el aire desde las grutas hasta las villas más alejadas.

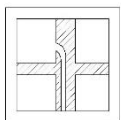
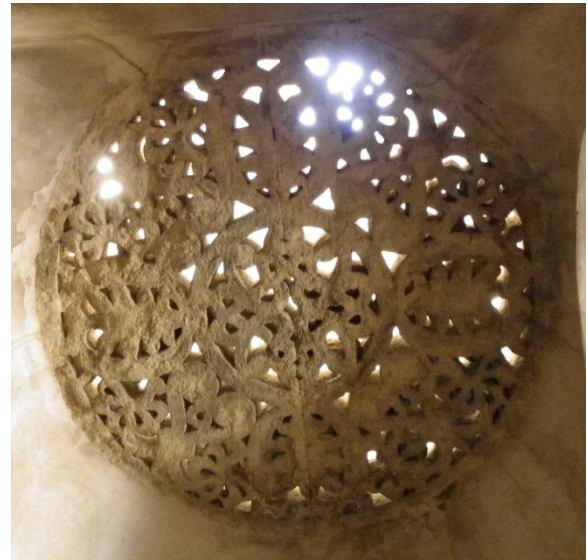
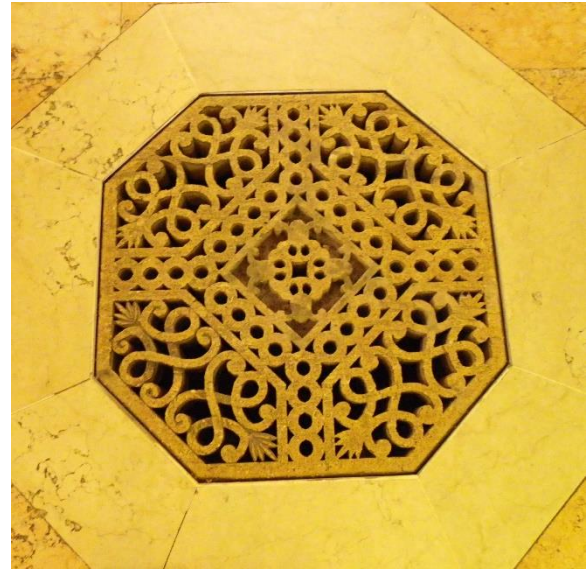


SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DEL AIRE EN EL EDIFICIO



ROSETTA VENT.

Rejillas de ventilación talladas en piedra colocadas en el suelo que permiten la entrada de aire desde estancias inferiores.

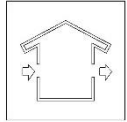


CONDUCTOS EN MUROS

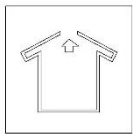
Conductos de ventilación verticales localizados en el interior de los muros que permiten la distribución de aire refrigerado desde estancias inferiores a otras superiores separadas más de un nivel.



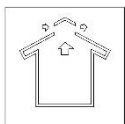
SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE AIRE DEL EDIFICIO

VENT.
CRUZADA

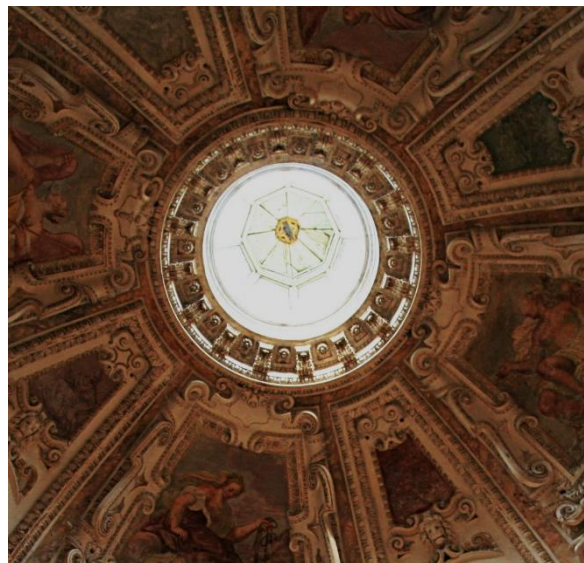
Extracción del aire caliente por diferencial de presiones en fachada.


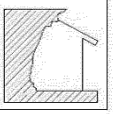
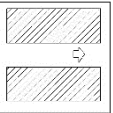
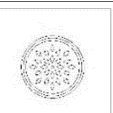
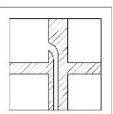
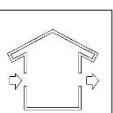
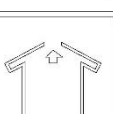
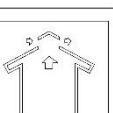
ÓCULO EN
CUBIERTA

Extracción del aire caliente mediante un hueco en el centro de la cúpula que cubre la estancia. El aire es expulsado por efecto chimenea.

LINTERNA EN
CUBIERTA

Extracción del aire caliente mediante linterna ventilada sobre la cúpula que cubre la estancia. El aire es expulsado por efecto chimenea pero la linterna acristalada permite un incremento de la temperatura en ese punto aumentando el diferencial térmico y por lo tanto la velocidad de extracción del aire.



		VILLAS						
		VILLAS DE COSTOZZA					ROCCA PISANA	
		MORLINI TRENTO	TRENTO CARLI	EOIA	DA SCHIO	GARZADORI		
TRATAMIENTO AIRE INYECCIÓN		COVOLI						
		SÓTANO SEMIENTERRADA				*		
		VENTIDOTTI						
DISTRIBUCIÓN		ROSETTA VENT.				*		
		CONDUCTOS	EN MUROS					
		VENT. CRUZADA						
EXTRACCIÓN		ÓCULO EN CUBIERTA						
		LINTERNA EN CUBIERTA						

* El Villino Garzadori presenta una configuración especial ya que se trata de una edificación semienterrada. La rosetta no se encuentra en el suelo, sino que presenta tres huecos con rejillas en la pared comunicando con la gruta.

3.3.1 EL CÓVOLO DE LOS VIENTOS Y EL SISTEMA DE VENTIDOTTI

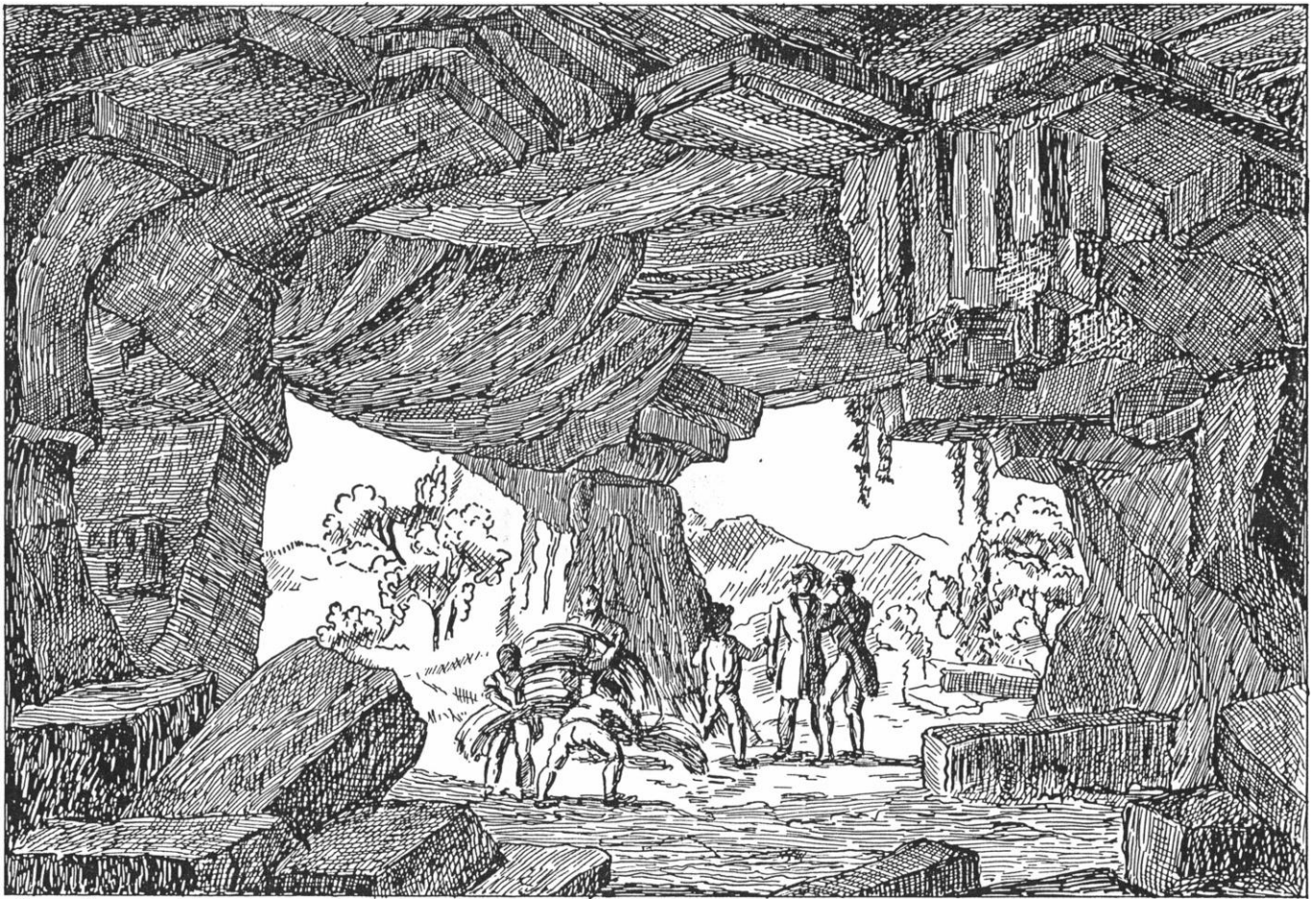
Previo a realizar el análisis de los distintos sistemas de climatización se hace necesaria una introducción a toda la red de cuevas naturales y artificiales que oradan el suelo de Costozza y que hicieron posible el sistema de climatización natural desarrollado por Francesco de Trento y que posteriormente inspirara a Palladio y Scamozzi.

Todo el territorio de Costozza está caracterizado por la presencia de grandes grutas llamadas covoli, de las cuales sólo una pequeña parte son de origen natural ya que en su mayoría fueron excavadas artificialmente, ya que la piedra calcárea que las componía resultaba de gran valor para escultores dada la facilidad que presentaba a ser tallada.

Estas grutas, que a lo largo del tiempo fueron utilizadas para múltiples actividades desde cantinas hasta escondites en períodos de guerra, tienen su mayor interés en las corrientes de aire térmicamente estable que en su interior se generan. Este fenómeno da lugar a unos sistemas de climatización natural basados en el aprovechamiento del aire de las grutas disponible en grandes volúmenes y a temperatura más o menos constante.

Mediante un sistema de conductos subterráneos, los Ventidotti, el aire se deja fluir por convección natural a las salas de algunas villas a través de unas rosetas de piedra en los suelos, u otras aberturas.

Las villas que presentan un sistema de climatización natural se pueden dividir en dos grupos, las que están directamente conectadas al sistema de los ventidotti, que son villa Trento Carli, Villa Eolia, Villa Morlini y las que presentan un sistema de climatización natural directamente conectado a la gruta (es decir, sin necesidad de conductos artificiales) Villa da Schio, Villa Ca'Molina y Villino Garzadori.



Chevalier dis. e inc.

in Padova 1842

INGRESSO ALLE CAVE DI COSTOSA

Fig. 3.10. Grabado del siglo XIX en el que se representan unos turistas contratando una visita guiada al "Cóvolo" mientras tres hombres preparan la paja para las antorchas. Fuente: E. Gleria

LA GRUTA DE LOS VIENTOS (IL COVOLO DEI VENTI)

En el centro del sistema de ventidotti está el covolo Carli, también llamado Covolo dei Venti (Gruta de los vientos). Esta cueva situada detrás de la villa Trento Carli está conectada con ésta, así como con Villa Eolia y Villa Morlini, mediante una red de tres conductos subterráneos los ventidotti, que llevan el aire desde la cueva hasta el interior de los edificios mencionados. Una de las descripciones más antiguas de esta Gruta es la de Pagliarini que data de 1663 en la que se comenta el origen del nombre de Costozza que deriva de Custodia

En esta cueva que se encuentra bajo la montaña los habitantes custodiaban los vinos y en periodo de guerra todos sus bienes, todos los

vecinos de los pueblos de los alrededores venían a guardar sus vinos ya que la temperatura casi constante a lo largo del año de la gruta facilitaba su conservación, así como la ausencia de luz.

Con respecto a sus dimensiones afirma que

[...] tenía una longitud de más o menos una milla, siendo así mismo bastante ancha y muy alta.²⁶

Esta información se extrae de “Historia de la famosa gruta llamada vulgarmente el Còvolo o Còvalo de Costozza” de



Fig. 3.11. Vista de uno de los accesos a la parte superior del cóvolo.

²⁶PAGLIARINI B. (1663) Croniche di Vicenza di Battista Pagliarino, pp. 348, Giacomo Amadio, Vicenza, rist. 1971, Historiae Urbium et Regionum Italiae Rariores, XLVII, Arnoldo Forni ed., Bologna.



Fig. 3.12. Interior de la Gruta.

Maccà²⁷ en la que se describen las grutas más importantes del territorio visitadas por él añadiendo también datos de escritores anteriores.

Maccà también da una descripción muy detallada del lugar en la que explica qué parte de la gruta era natural y qué parte modificada por el hombre. Probablemente en su época la forma del cóvolo era muy diferente, tenía una entrada situada hacia poniente y otra hacia Vicenza, sin embargo con los derrumbes que ha habido debido a las modificaciones y adaptaciones realizadas durante la Segunda Guerra Mundial hubo un desplazamiento de grandes volúmenes de material hacia el lado izquierdo lo que ha supuesto una reducción en el ancho de la gruta.

Actualmente el Covolo de los vientos tiene una longitud de casi 350 metros y alcanza una anchura de casi 80 metros y una altura máxima de casi 15 metros. Desde la entrada (Fig. 3.11) se accede inicialmente a un amplio recinto, inmediatamente a la izquierda hay un pasaje más bajo que conduce a la entrada del ventidotti A continuando por este pasaje se accede a una sala

²⁷ MACCÀ' G. (1799) Storia della famosa grotta detta volgarmente il Covolo, o Covolo di Costoza dedicata all'antico e nobile collegio de' sigg. Notaj di Vicenza, pp. XXII-104, Giovanni Rossi, Vicenza; rist. 1989, Cartolibreria Pederiva, Grancona (Vi).

superior desde la que se produce la entrada al ventidotti B encontrándose en esta sala los restos de la antigua entrada a la gruta, en la parte superior de uno de sus vanos encontramos una lápida con fecha de 1887 como testimonio de la intervención de cierre de la galería. A la derecha de la entrada principal encontramos entre rocas y grava el acceso al covoletto, si continuamos hacia adelante en esta misma dirección encontramos unos peldaños que bajan a una habitación lateral en la que encontramos una pequeña laguna interior.

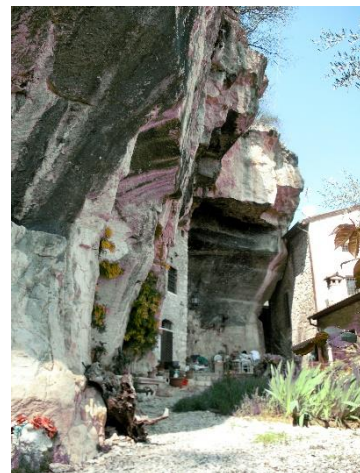
Siguiendo el eje principal de la gruta alcanzamos una segunda sala amplia que se sustenta sobre unas columnas, a la derecha de esta sala unos vanos laterales delimitados por muros se suceden hasta la altura del centro de la sala siguiendo la huella de un camino interno. A la izquierda de esta sala encontramos restos acumulados de algunos derrumbes, siguiendo estos escombros se puede acceder a las salas superiores que conducen a unos pasajes actualmente impracticables en los que se producen fuertes corrientes de aire. Casi a 200 metros desde la entrada un tramo en rampa supone una clara separación entre dos partes de la gruta situadas a dos niveles

↓ En esta página

Figs. 3.13 y 3.14 Vistas de distintos accesos al Covolo. Fuente: Claudio Gioseffi.

→ En la página siguiente

Fig. 3.15 Planimetría general de la zona de Costozza, se han resaltado los Covoli de Costozza, el Covolo dei Venti, el Covolo Marinali, la grotta della Cantina da Schio y los Ventidotti. Reelaboración de un mapa propiedad del Conde A. da Schio al que se le superponen mediciones elaboradas por el Club de Espeleología Proteo. P.Verico



PLANIMETRIA D'INSIEME
GROTTE DI COSTOZZA E LONGARE

diferentes y conectadas por dicha excavación a la derecha encontramos una fuente cuyas aguas quedan almacenadas en un depósito, si continuamos subiendo levemente alcanzamos el final del cóvolo, los vanos situados en la parte izquierda se sitúan en un nivel aún más alto generando fuertes corrientes de aire.

El levantamiento topográfico de la gruta ha sido elaborado por el club de Espeleología Proteo en varias expediciones, de las cuales la última se produce en 2004, el último tramo de ventidotti (el que llega a la Villa Morlini Trento) no es practicable y no ha podido realizarse su levantamiento debido a la oposición del propietario.

LOS VENTIDOTTI

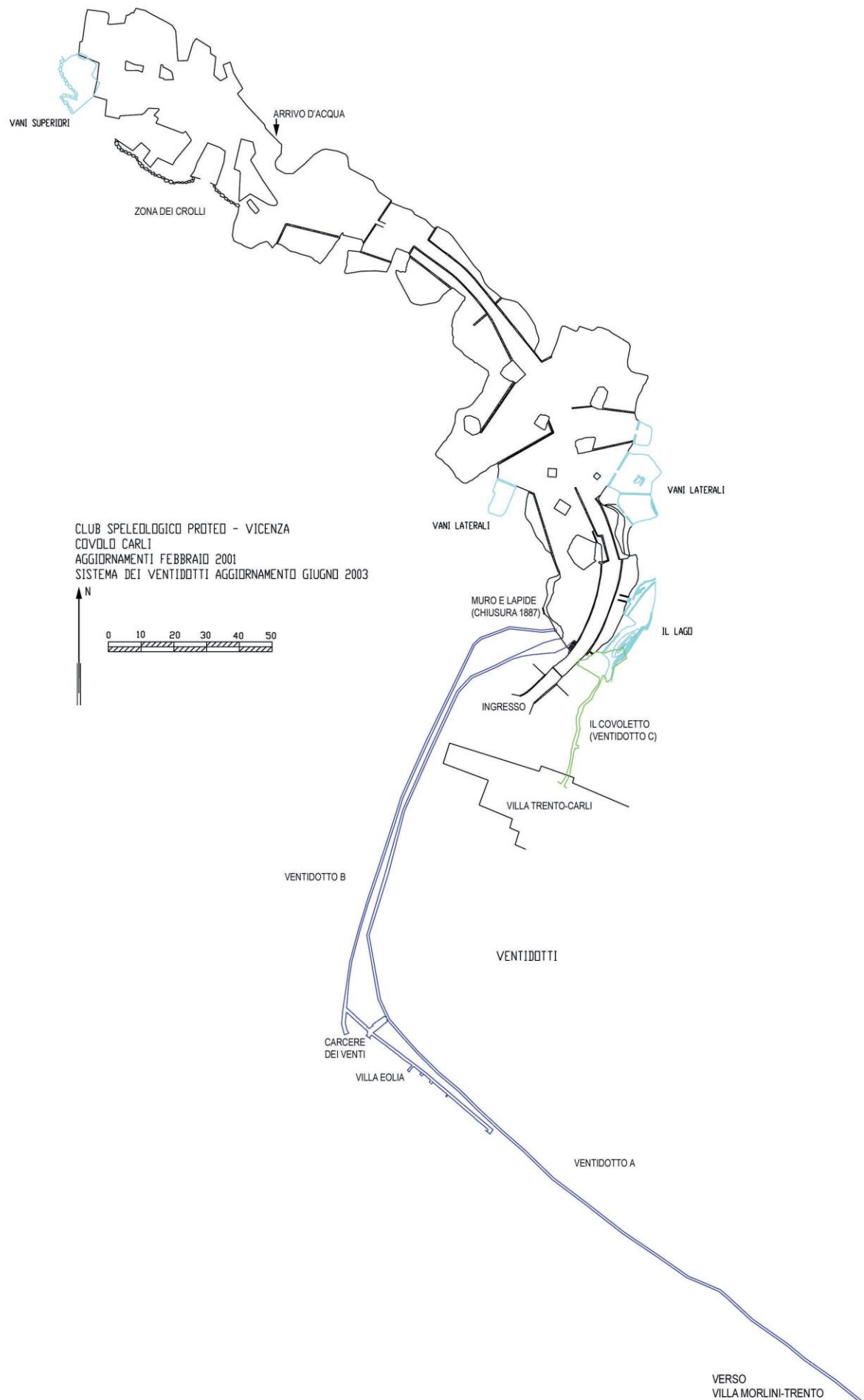
Actualmente los ventidotti visitables son tres, el más corto desde el Cóvolo dei Venti, llega directamente al interior de la Villa Trento-Carli en la Sala del Covoletto. Los otros dos que parten de la misma gruta llegan a Villa Eolia y a Villa Morlini Trento.

El ventidotto C es el más incómodo de recorrer por la presencia de agua y por algunos derrumbes que han reducido considerablemente su sección. Está completamente excavado en la roca, y el material de fábrica se limita a algunas bóvedas de contención del material pétreo. La longitud actual es de casi 35 metros y tras recorrerlo se llega a la sala parcialmente derrumbada y que se sitúa totalmente pegada a la laguna anteriormente mencionada. La altura del pasaje oscila entre 1,60 y 1,10 metros y puede llegar a tener un ancho de hasta 60 cm el último tramo justo antes de la sala se encuentra en una leve pendiente.

Desde Villa Trento-Carli se accede a una galería a través de una puerta situada en la Sala del Covoletto, al bajar unos peldaños esta galería se encuentra encharcada a lo largo de una longitud de 25 metros y con una profundidad de 50 cm, después

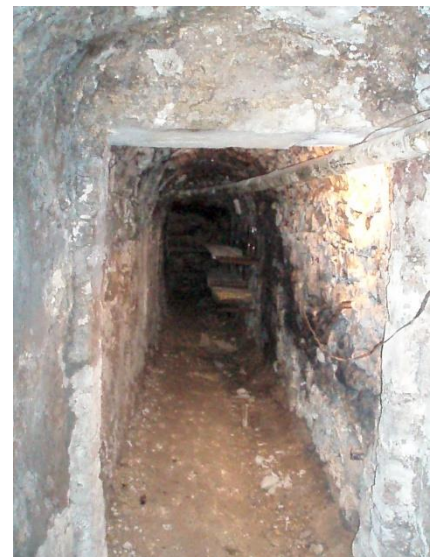
→ En la página siguiente:

Fig. 3.16 Planimetría del Covoletto Carli y de los Ventidotti.



de ese tramo, a la derecha hay una parte derrumbada y un arco de ladrillos.

Los otros dos ventidotti, el A y el B, parcialmente enterrados, tienen una sección más o menos constante y unas dimensiones que permiten el acceso de una persona levemente agachada. El ventidotti B tiene su origen en el Còvolo de los vientos, bajo la antigua entrada a la gruta. La entrada original de la Gruta de los vientos, ya descrita por Maccà, dista casi 30 metros de la actual, y de ella se pueden apreciar los restos de un arco de ladrillo. El acceso al Ventidotto B está cortado por una reja metálica. El ventidotto tiene una longitud de 125 metros y su recorrido transcurre paralelo y próximo al ventidotto A. A una cierta altura encontramos un pasaje que conecta ambos ventidotti. La bóveda del ventidotto B está construida en fábrica de ladrillo, mientras que las paredes son de piedra. Una vez llega a la Villa Eolia se divide en dos tramos, una que entra directamente en la Carcel de los Vientos y la otra que continúa hacia la bodega construida en la parte oriental de la villa. El ventidotto A llega a alcanzar una altura de 1,70 metros, mientras que su anchura es casi igual a la del ventidotto B y supone una media de aproximada un metro en todo su recorrido. Comienza a la izquierda de la actual entrada del



Covolo de los vientos. El primer tramo está en su totalidad excavado en la roca, para posteriormente pasar a una bóveda de ladrillos, esta última careciente de una urdimbre constante, los laterales son en parte de roca y en parte de muros de piedra y ladrillos.

El principio en el que se basa el sistema de climatización natural de las villas de Costozza es la disponibilidad de grandes masas de aire a temperatura constante que circulan en las diferentes grutas, tanto naturales como artificiales presentes en la zona. La temperatura del aire es constante gracias a la inercia térmica de la roca y del terreno. Dentro de las grutas el aire se mueve por corrientes convectivas originadas por la diferencia de cota entre las entradas, estos movimientos sufren variaciones estacionales y diarias.

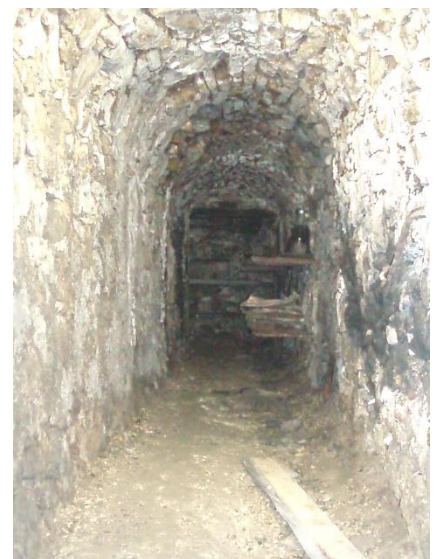
A lo largo del tiempo los ventidotto A Y B han mantenido intacta su función de tratamiento de aire, así como la cárcel de los vientos.

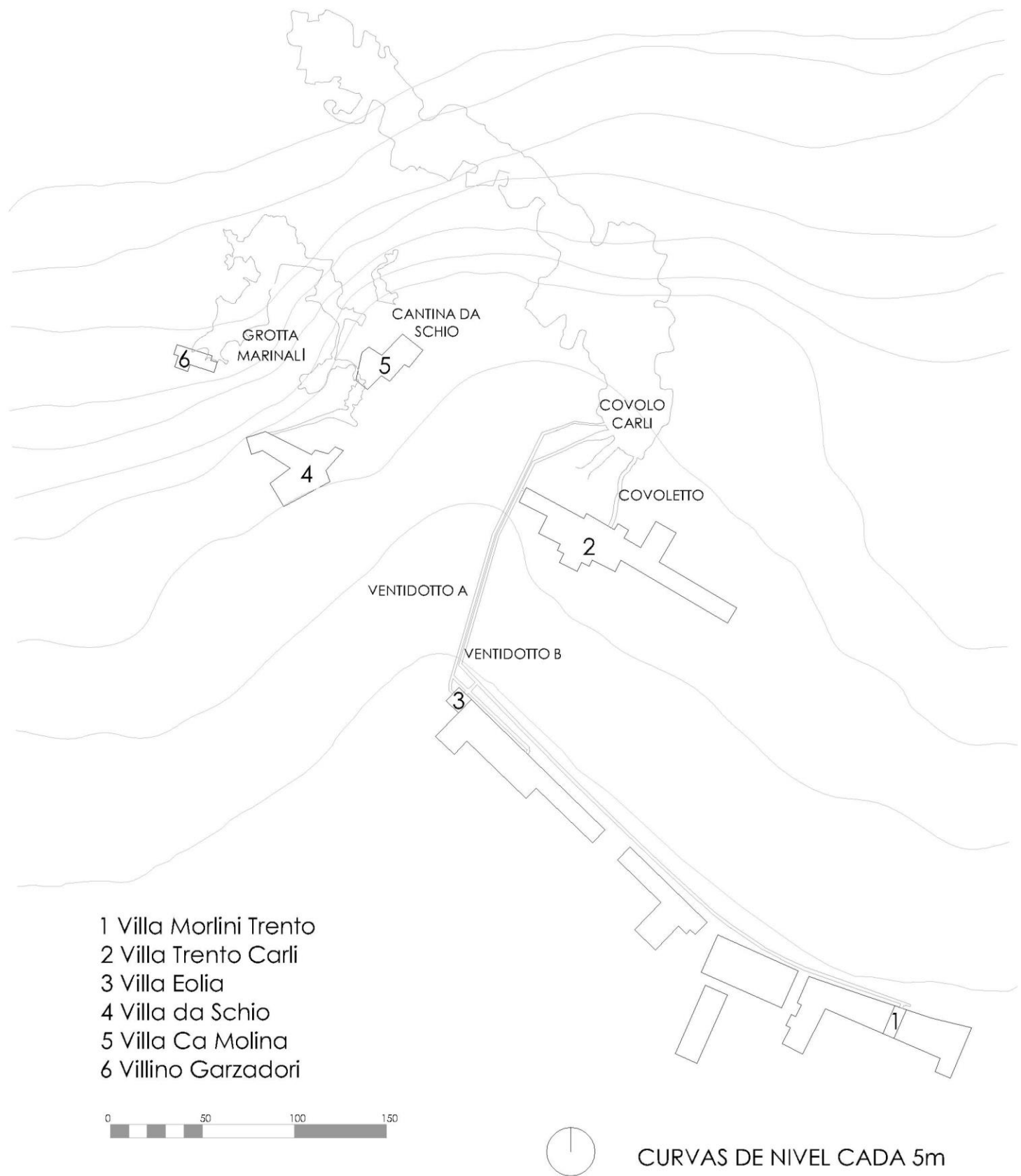
A continuación, la ← En la página anterior:

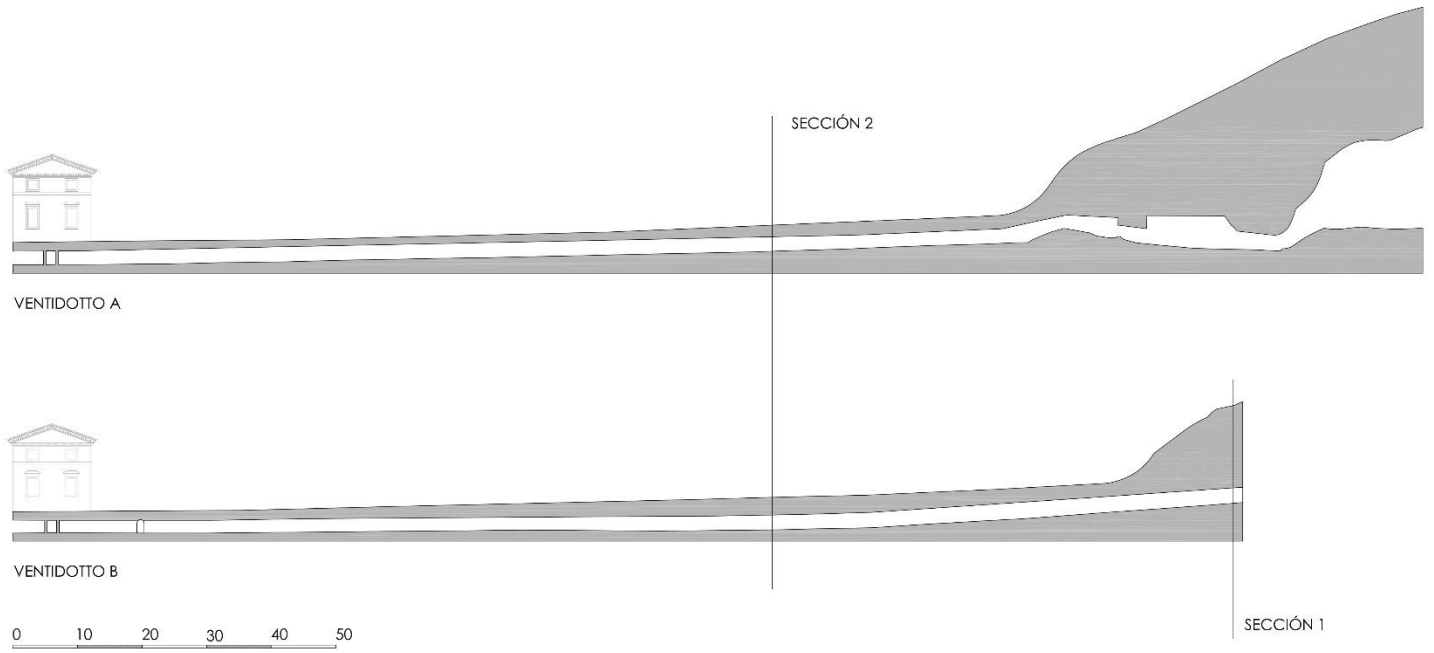
Fig. 3.23 representa la situación en planta de las Villas de Costozza y de los ventidotti.

↙↓

Figs. 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22. Interior de los ventidotti AyB.

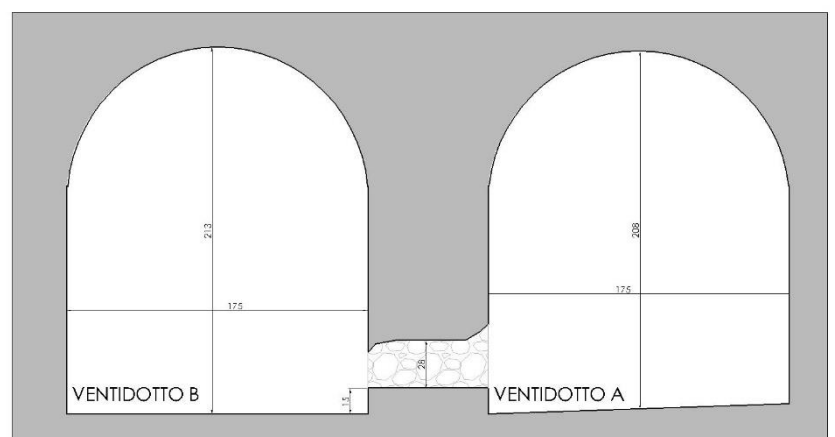
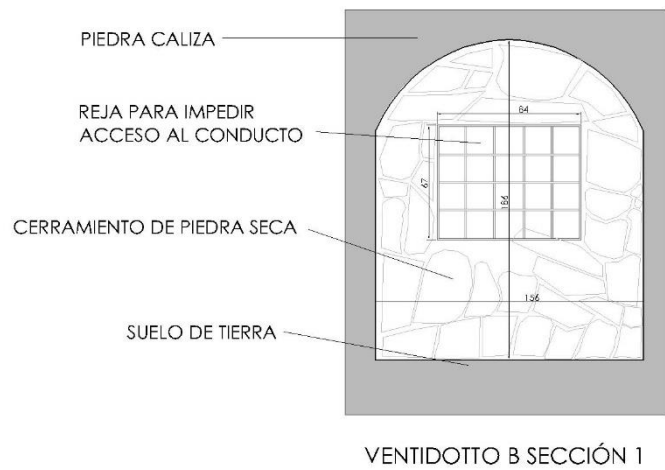


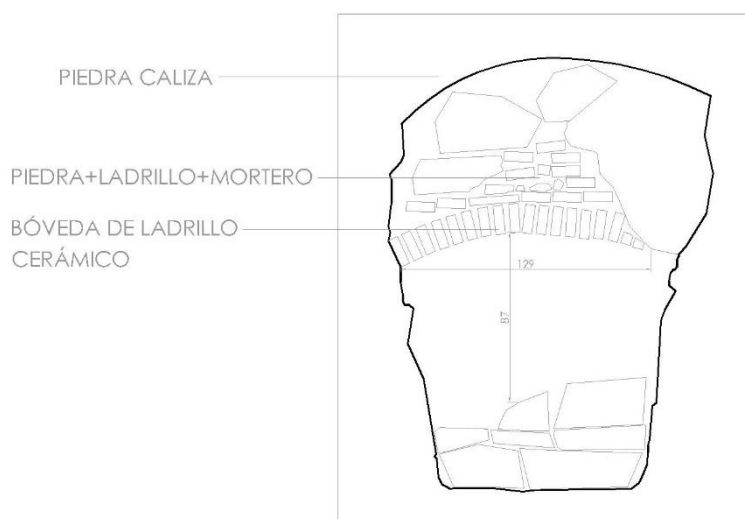
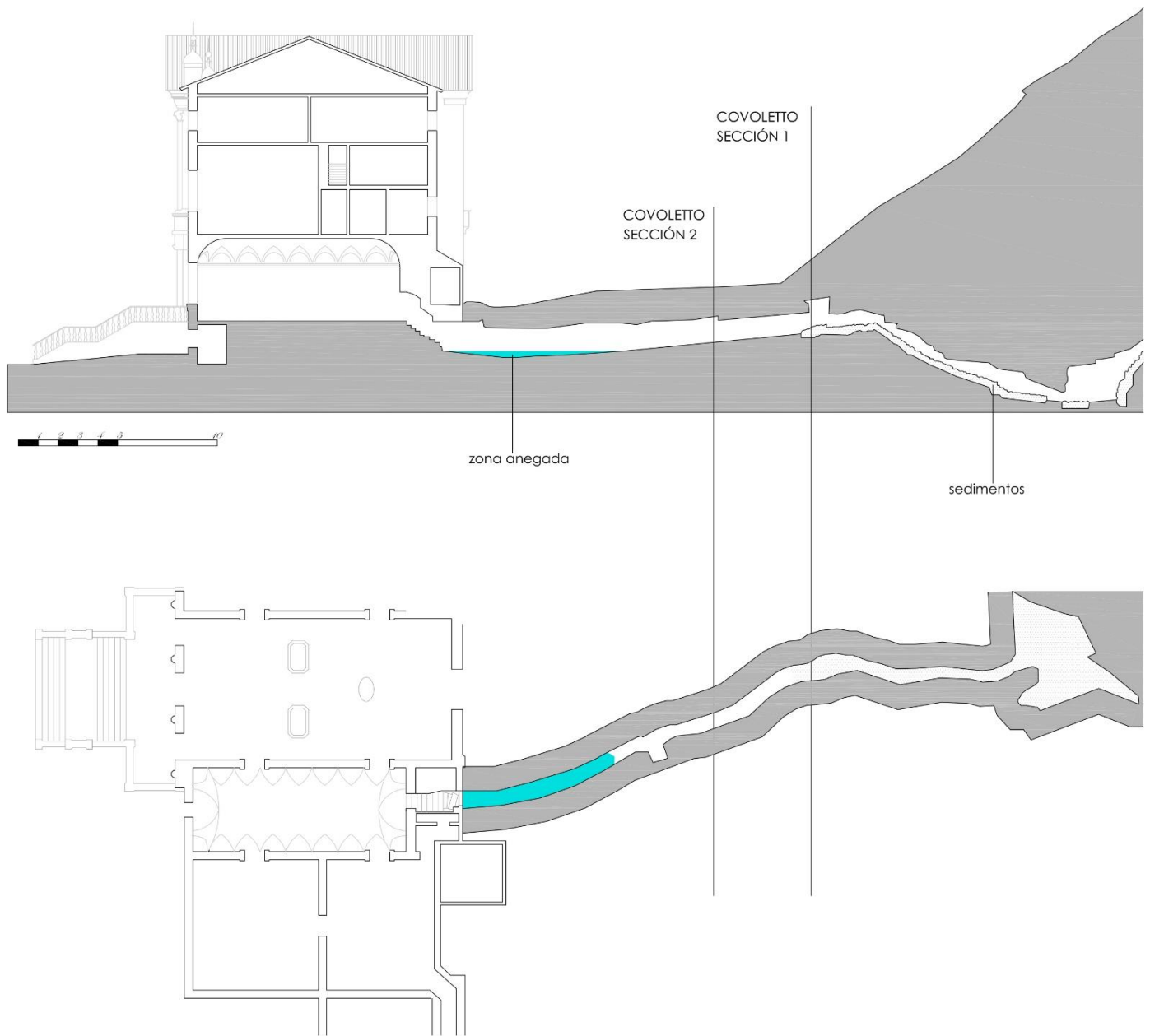




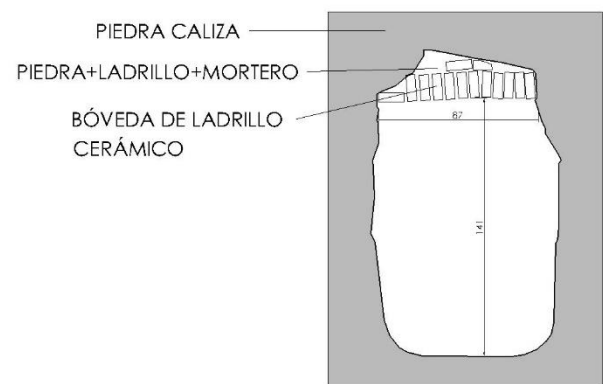
← En la página anterior:
Fig. 3.23. Plano de situación
de Villas, Cúvolos y
Ventidotti.

↑→ En esta página:
Figs. 3.24., 3.25., y 3.26.
Secciones longitudinales y
transversales de los
Ventidotti.





COVOLETO SECCIÓN 1



COVOLETO SECCIÓN 2

INTERCAMBIO TERMICO EN EL SISTEMA DE COVOLI Y VENTIDOTTI. SIMULACIONES Y MEDICIONES.

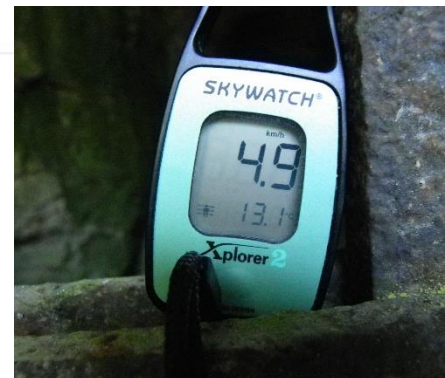
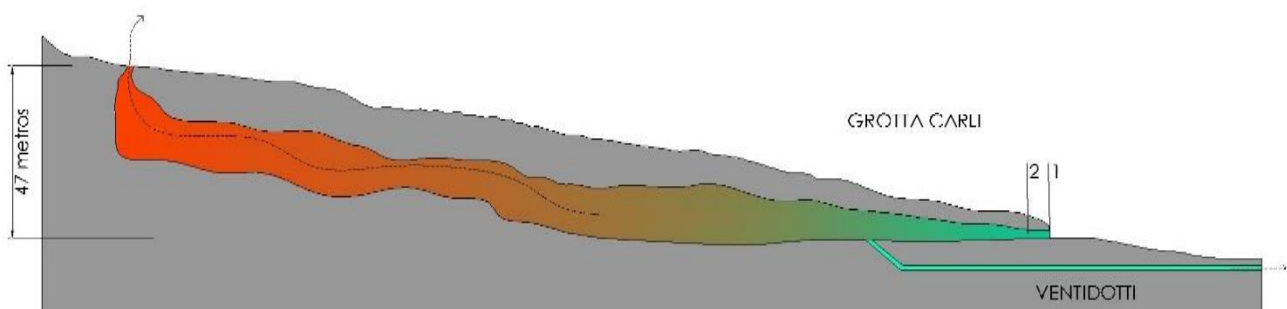
A continuación procederemos al análisis bioclimático tanto de los Covoli como de los Ventidotti, ya que serán estos sistemas los que realicen la refrigeración del aire que ingresa a las Villas de Costozza. De este estudio previo obtendremos las condiciones del aire que ingresa en las villas que se encuentran conectadas a este sistema. Nos interesa conocer tanto el caudal de aire que estamos ingresando como la temperatura a la que este se encuentra. Una vez realizado este estudio los resultados obtenidos nos permitirán evaluar su incidencia en la climatización natural de las villas que se encuentran conectadas al mismo.

↖ En la página anterior:
Figs. 3.27., 3.28., y 3.29.
Secciones longitudinales y
transversales del Covoletto.

↓ En esta página:
Fig. 3.30. Esquema de
funcionamiento del Covoletto.
Figs. 3.31., 3.32., y 3.33.
Imágenes de la toma de
datos en Grotta Carli.

1. COVOLO DEI VENTI

Si estudiamos el Covolo de los vientos vemos que su morfología permite que el aire caliente salga por aberturas superiores mientras en la parte inferior de la gruta permanecerá una bolsa de aire a menor temperatura tal y como se muestra a continuación. Este fenómeno se produciría tanto en invierno como en verano, lo que provocaría que en la embocadura de



la Grotta Carli el aire entrara o saliese de la gruta según la temperatura exterior fuera superior o inferior a la misma. Las mediciones que se realizaron en distintos momentos del año y que a continuación se muestran ilustrarían claramente este fenómeno.

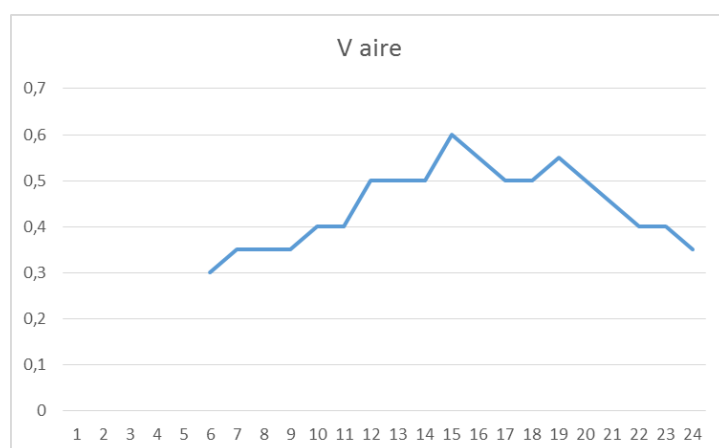
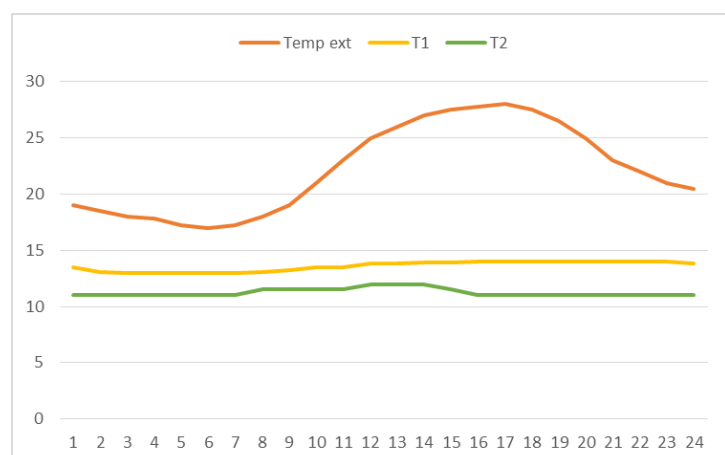
La toma de datos se realizó en los puntos 1 y 2 y las fechas elegidas serían el 14 de Agosto de 2012 y el 28 de Noviembre de 2013.

En primer lugar, estudiamos los datos obtenidos en verano (Tabla 3.1).

DÍA VERANO					
hora	Text	1	2	Vaire (km/h)	Vaire (m/s)
1	19	13,5	11	0	
2	18,5	13,1	11	0	
3	18	13	11	0	
4	17,8	13	11	0	
5	17,2	13	11	0	
6	17	13	11	1,08	0,3
7	17,2	13	11	1,26	0,35
8	18	13,1	11,5	1,26	0,35
9	19	13,2	11,5	1,26	0,35
10	21	13,5	11,5	1,44	0,4
11	23	13,5	11,5	1,44	0,4
12	25	13,8	12	1,8	0,5
13	26	13,8	12	1,8	0,5
14	27	13,9	12	1,8	0,5
15	27,5	13,9	11,5	2,16	0,6
16	27,8	14	11	1,98	0,55
17	28	14	11	1,8	0,5
18	27,5	14	11	1,8	0,5
19	26,5	14	11	1,98	0,55
20	25	14	11	1,8	0,5
21	23	14	11	1,62	0,45
22	22	14	11	1,44	0,4
23	21	14	11	1,44	0,4
24	20,5	13,8	11	1,26	0,35

Tabla 3.1 Datos tomados durante el día 14 de Agosto del 2012 en Grotta Carli.

Las temperaturas del aire en el interior de la Grotta Carli (2) permanecen constantes en torno a 11,5°C. La velocidad del aire es siempre positiva, por lo que el aire fresco saldría del



Covolo hacia el exterior dándonos temperaturas en torno a los 13,5 °C a la salida de la Grotta Carli (1). Las gráficas aportadas ilustran estos resultados.

Vemos a continuación los datos obtenidos el 28 de Noviembre.

↑

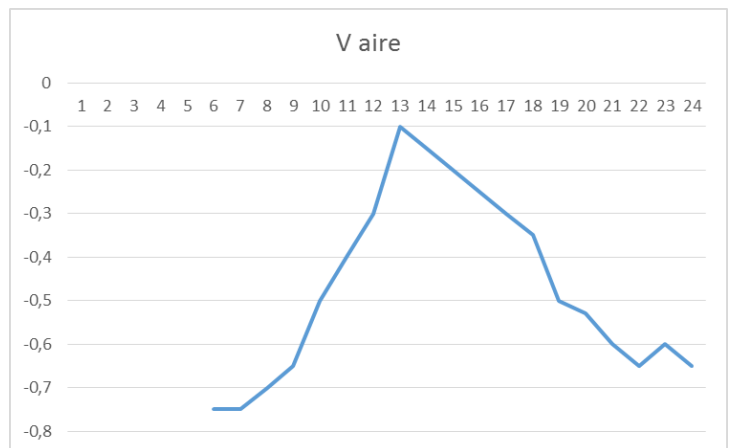
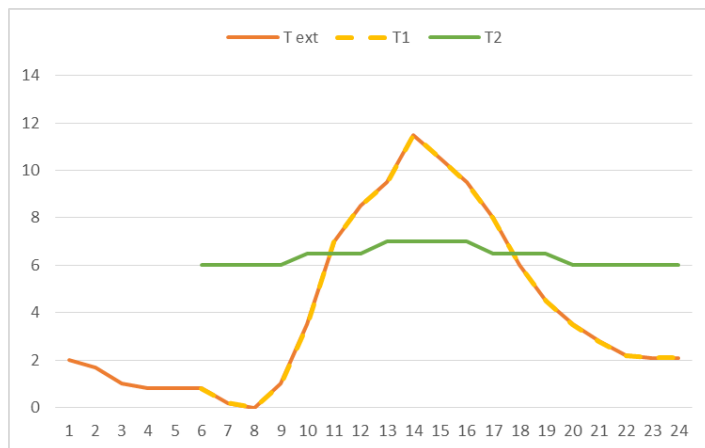
Fig. 3.34. Comparativa de temperaturas exteriores y las medidas en las secciones 1 y 2 de Grotta Carli en período estival.

Fig. 3.35. Velocidad del aire y dirección del mismo a la salida de la Grotta en período estival.

→

Tabla 3.2 Datos tomados durante el día 28 de Noviembre de 2013 en Grotta Carli.

DIA INVIERNO						
hora	Text	1	2	Vaire (km/h)	Vaire (m/s)	
1	2			0		
2	1,7			0		
3	1			0		
4	0,8			0		
5	0,8			0		
6	0,8	0,8	6	-2,7	-0,75	
7	0,2	0,2	6	-2,7	-0,75	
8	0	0	6	-2,52	-0,7	
9	1	1	6	-2,34	-0,65	
10	3,5	3,5	6,5	-1,8	-0,5	
11	7	7	6,5	-1,44	-0,4	
12	8,5	8,5	6,5	-1,08	-0,3	
13	9,5	9,5	7	-0,36	-0,1	
14	11,5	11,5	7	-0,54	-0,15	
15	10,5	10,5	7	-0,72	-0,2	
16	9,5	9,5	7	-0,9	-0,25	
17	8	8	6,5	-1,08	-0,3	
18	6	6	6,5	-1,26	-0,35	
19	4,5	4,5	6,5	-1,8	-0,5	
20	3,5	3,5	6	-1,908	-0,53	
21	2,8	2,8	6	-2,16	-0,6	
22	2,2	2,2	6	-2,34	-0,65	
23	2,1	2,1	6	-2,16	-0,6	
24	2,1	2,1	6	-2,34	-0,65	



Durante el invierno las temperaturas en la sección 1 serán iguales a las exteriores ya que el aire se desplaza del exterior al interior de la gruta. Las gráficas de temperaturas y velocidad del aire son ilustrativas de estos resultados.

Para el análisis de las villas trabajaremos exclusivamente con los resultados obtenidos durante el verano ya que para nuestro estudio nos interesa el potencial de refrigeración, no obstante los datos tomados durante el día de invierno nos han servido para ilustrar el comportamiento del aire dentro del Covolo tal y como describíamos en la Fig. 3.30.

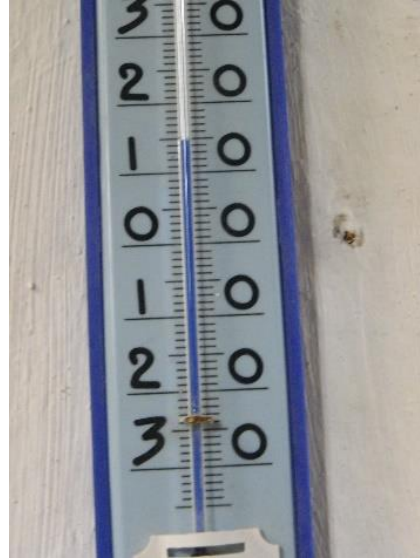
Las temperaturas y velocidades aquí obtenidas se utilizarán posteriormente para el análisis de los Ventidotti A, B y Covoletto y, poste de la villas Morlini Trento, Trento Carli y Eolia.

↑

Fig. 3.36. Comparativa de temperaturas exteriores y las medidas en las secciones 1 y 2 de Grotta Carli en período invernal.

Fig. 3.37. Velocidad del aire y dirección del mismo a la salida de la Grotta en período invernal.

2. COVOLO DA SCHIO Y GROTTA MARINALI



↑

Figs. 3.38. y 3.39 Toma de datos a la Salida del Covoletto da Schio.

Figs. 3.40. Salidas de aire de la Grotta Marinali en el interior del Villino Garzadori.

Para el mismo día de verano se realizaron mediciones tanto en el Covoletto da Schio como en la Grotta Marinali con los resultados que se muestran a continuación. Las limitaciones de acceso a los mismos no nos permitieron una toma de datos tan exhaustiva como para el caso anterior, no obstante dado que, tal y como hemos podido comprobar en el Covoletto dei Venti, las temperaturas se mantienen bastante constantes a lo largo del día por lo que no consideramos de mayor importancia esta limitación.

En el caso del Covoletto da Schio hemos realizado la medición en el interior del covoletto y en la entrada desde la Villa da Schio según está señalado en la fig. 3.38.

Tabla 3.3. Datos recogidos en el Covoletto da Schio el 18 de Agosto de 2012 a las 12 y a las 18 h. Temperatura y velocidad del aire.

Covoletto da Schio			
	Hora	T (°C)	V (m/s)
Cueva	12	13,5	0,35
	18	13	0,4
Escaleras	12	16	0,65
	18	16	0,7

Cabe señalar que la embocadura del Covoletto da Schio se encuentra a mayor altura que la Grotta Carli, con una diferencia de unos siete metros entre ambas, lo que se puede

apreciar en los datos de temperatura obtenidos, resultando éstas más elevadas.

VILINO GARZADORI/GROTTA MARINALI		
Flujo de la gruta a la sala		
17h	Temperatura aire	20
	Velocidad aire	0,25
	Temperatura sala	21

Tabla 3.4. Datos recogidos en la Grotta Marinali el 18 de Agosto de 2012 a las 17 h. Temperatura y velocidad del aire.

En el caso del Villino Garzadori observamos cómo la temperatura en el interior de la sala es tan solo un grado superior a la temperatura del aire que emana de la Grotta Marinali lo que se explicaría por el hecho de que esta villa se encuentra a su vez excavada también en la roca, por lo que en este caso el aprovechamiento directo de la inercia térmica de la pared del fondo de la estancia resulta de mayor importancia.

3. VENTIDOTTI

Una vez estudiados los cóvoli y teniendo así unos datos de partida, podremos proceder al análisis de los Ventidotti, el cual nos resulta de particular interés con el fin de evaluar la herramienta de predimensionamiento de conductos enterrados desarrollada en la primera fase de nuestra investigación²⁸.

Como ya describimos previamente los ventidotti serían tres y los hemos clasificado de la siguiente manera:

- Ventidotto A
- Ventidotto B
- Covoletto.

Dado que las secciones de los tres ventidotti son bastante similares al igual que los materiales que los componen realizaremos las simulaciones y comprobaciones para el

²⁸ Véase pag.32

ventidotto A y posteriormente extrapolaremos los resultados al resto de los casos.

El Ventidotto A comunicaría el Covolo dei Venti con la Villa Eolia, por lo que partiríamos de los datos de temperaturas obtenidas en el interior de la Grotta Carli que sería el punto de partida del mismo.

Comenzaremos nuestro estudio introduciendo los datos del conducto seleccionado en la herramienta para poder posteriormente realizar una comparativa de los resultados obtenidos y las mediciones.

En primer lugar introduciremos la geometría del conducto junto con los datos climáticos de la región y las características físico-químicas de terreno²⁹.

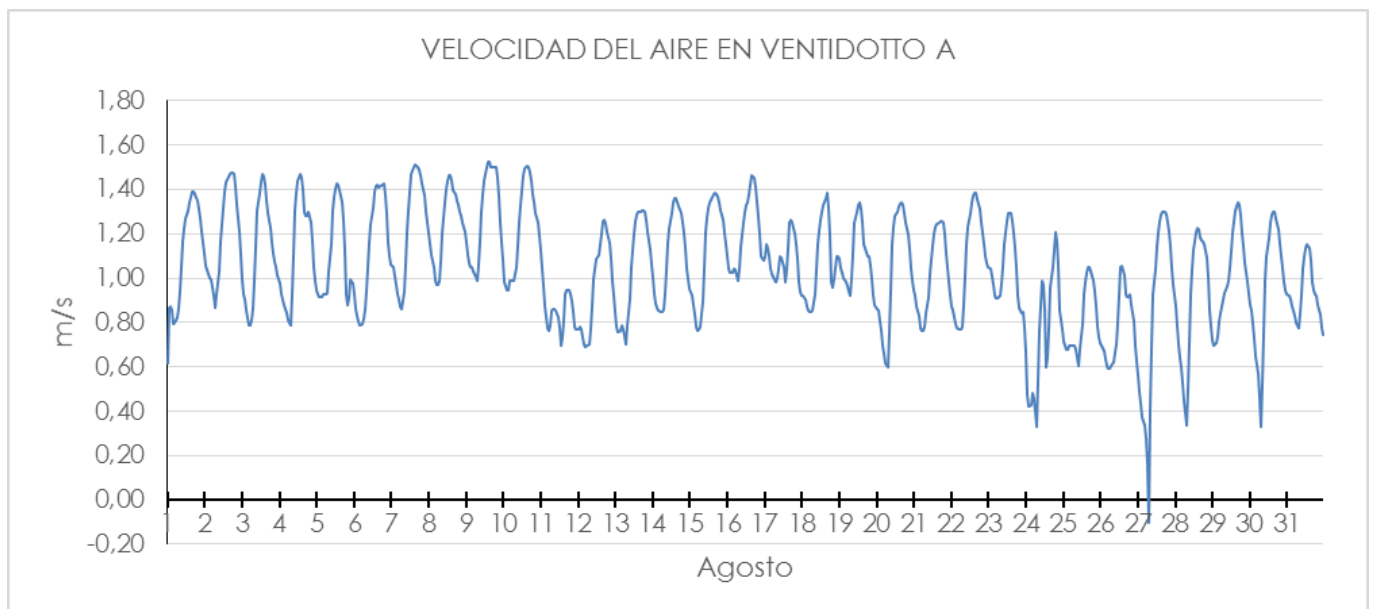
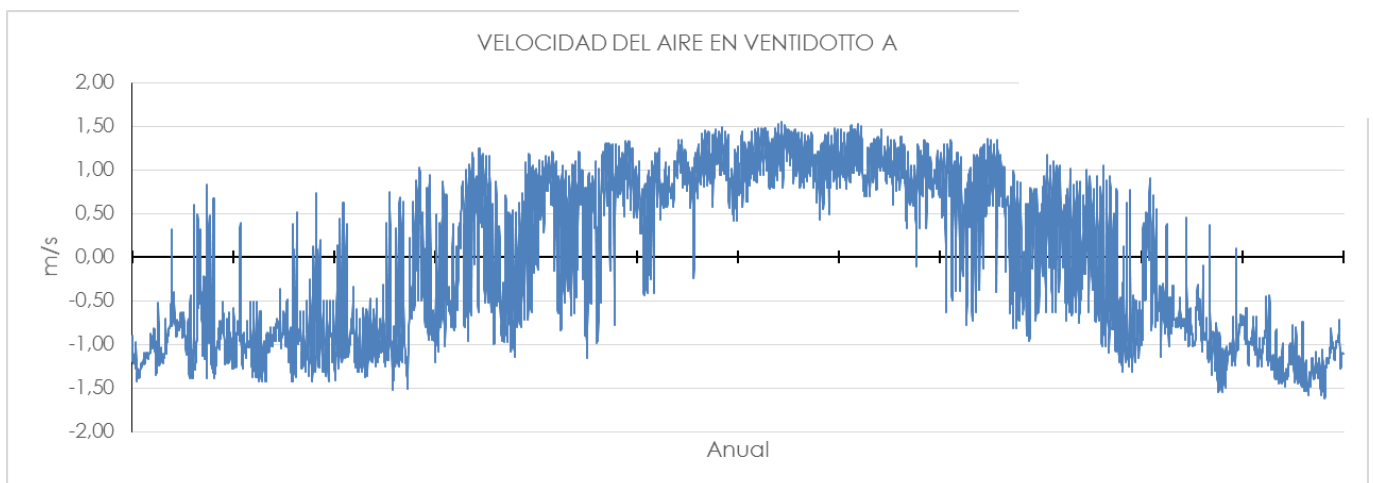
La geometría la simplificaremos utilizando un diámetro equivalente de 1 metro en toda la longitud del ventidotto.

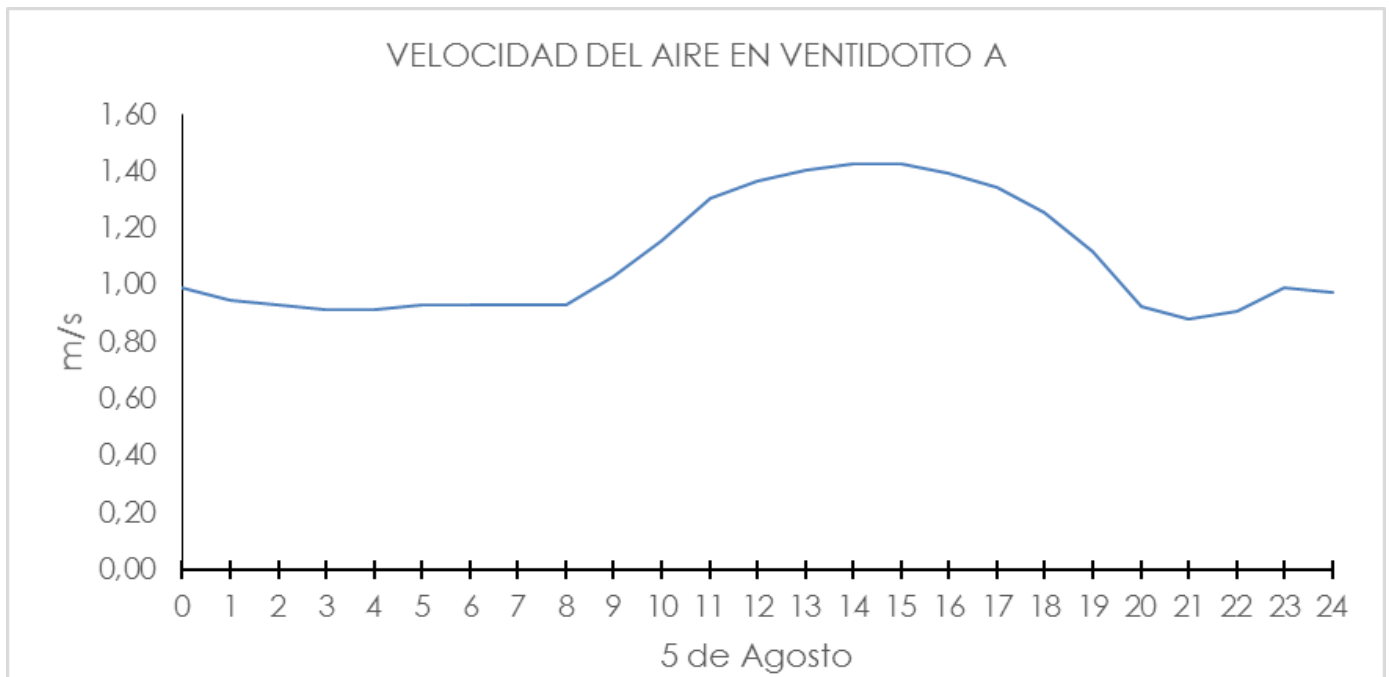
Geometry			Soil		
Ltub	m	180	Lamsol	W/K.m	1,9
Rtub	m	0,50	Csol	MJ/K.m3	1,9
Rbord	m	3,00	Asol	m2/an	31,536
Stub	m2/tub	565,49			
Sair	m2/tub	0,79			

²⁹ Véase pags. 47y 48

Una vez introducidos los datos en la herramienta obtendremos unos valores horarios para las velocidades iniciales en el conducto, obteniendo gráficas anuales, mensuales y diarias como se muestran a continuación. Nos centraremos en el período estival y elegiremos el día 5 del mes de Agosto para nuestro estudio, ya que es aquel cuyas condiciones climáticas más se aproximarían a las del día en que se realizaron las mediciones.

Figs. 3.42.y 3.43. Resultados de la simulación. Velocidad del aire en el ventidotto A con resultados horarios. Gráficas anual y mensual.





↑

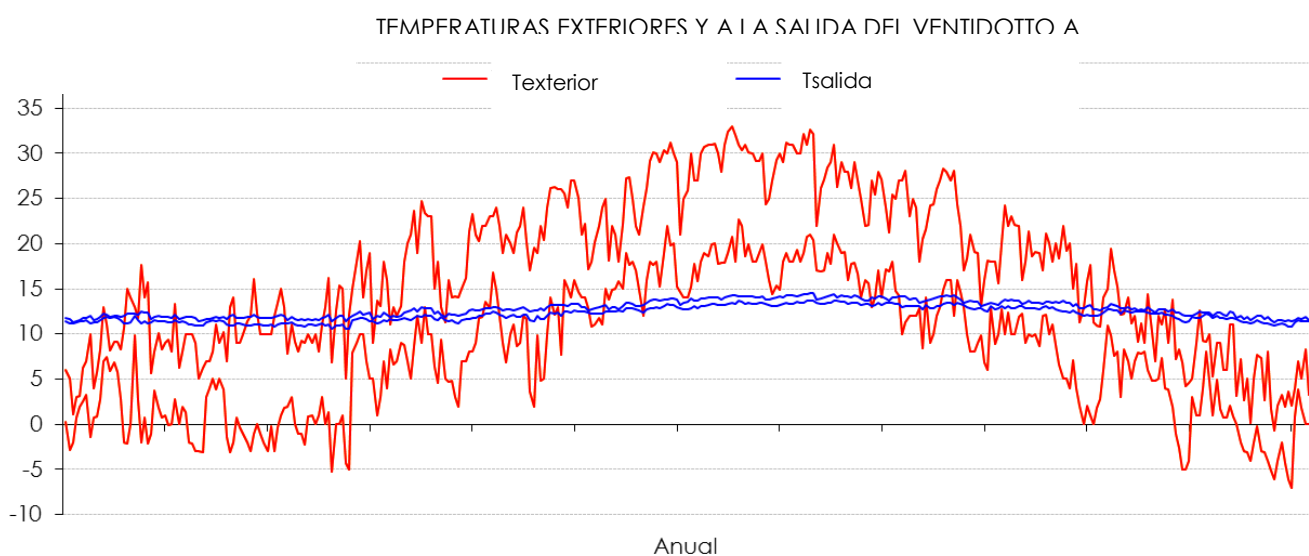
Fig. 3.44. Datos obtenidos tras la modelización del ventidotto A. Velocidad del aire con resultados horarios. Gráfica para el mes de Agosto.

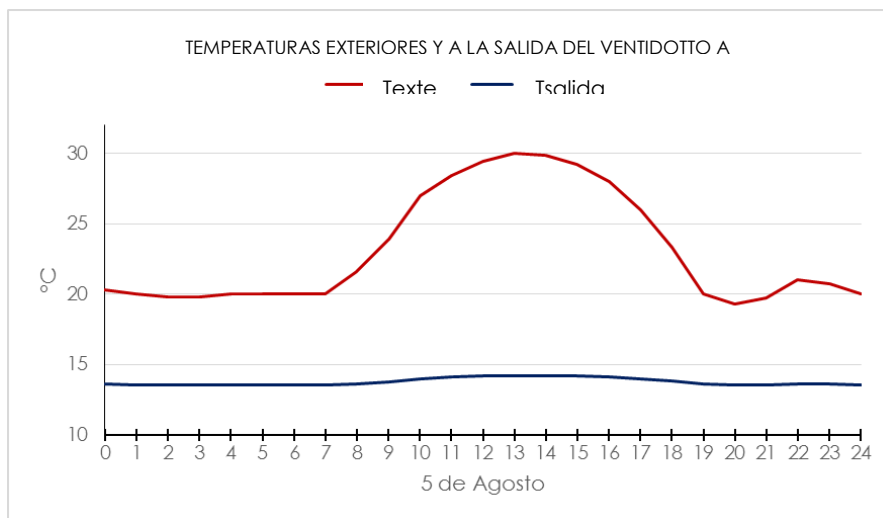
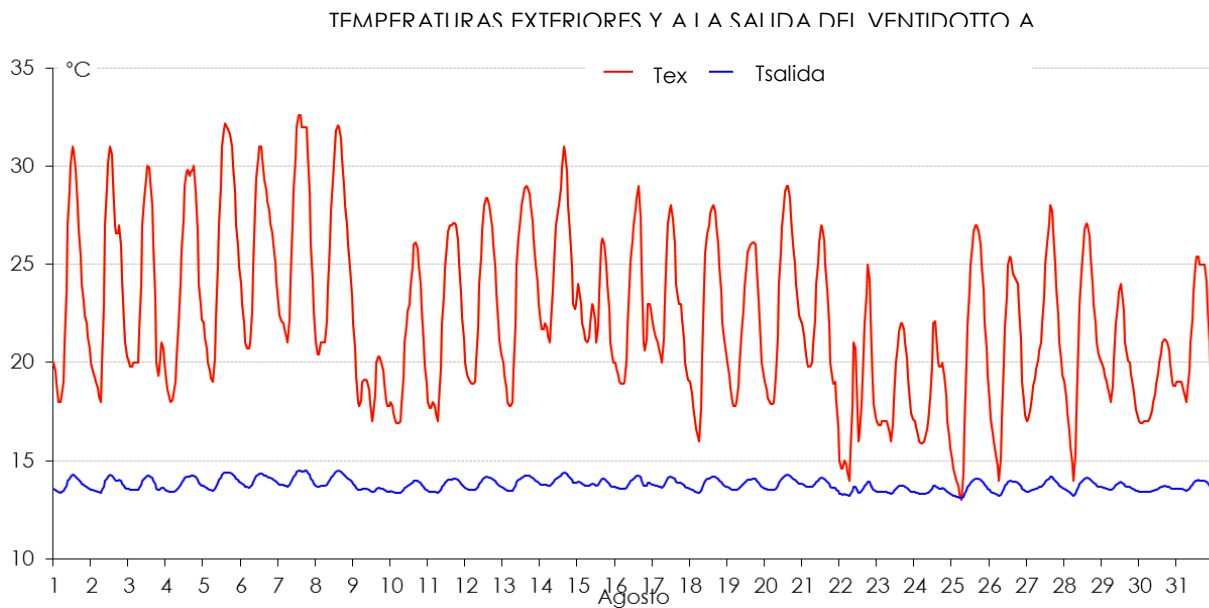
Comprobamos que efectivamente las velocidades de aire serían negativas en los meses de invierno y positivas durante los meses de verano, lo que implicaría que el aire fresco recorrería el ventidotto desde el Còvolo dei Venti hacia la Villa Eolia.

↓

Fig. 3.45. Datos obtenidos tras la modelización del ventidotto A. Temperatura del aire exterior y a la salida del mismo con resultados horarios. Gráfica anual.

Siempre con la misma herramienta y partiendo de esos valores de velocidad en el Ventidotto procederemos posteriormente al cálculo de las temperaturas a la salida del mismo.





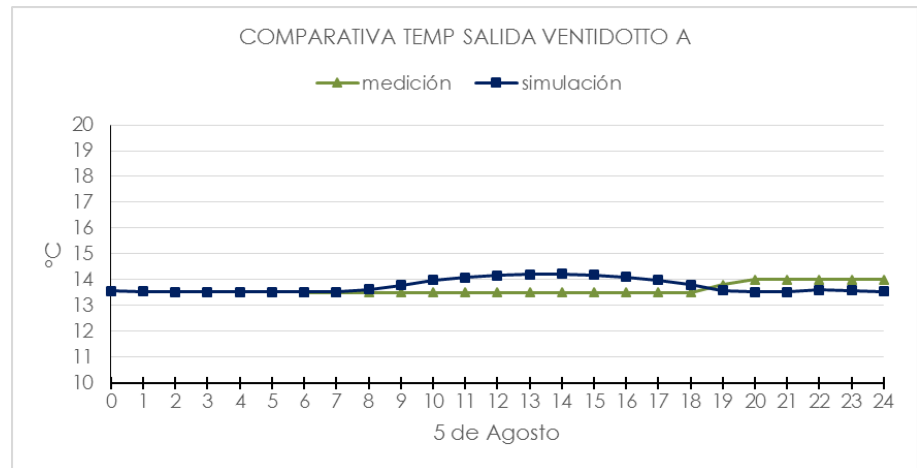
↑

Fig. 3.46. Datos obtenidas tras la modelización del ventidotto A. Temperatura del aire exterior y a la salida del mismo con resultados horarios. Gráfica para el mes de Agosto.

Fig. 3.47. Datos obtenidas tras la modelización del ventidotto A. Temperatura del aire exterior y a la salida del mismo con resultados horarios. Gráfica para el día 5 de Agosto.

Es apreciable la amortización de la temperatura del aire que aporta el sistema enterrado

Una vez modelizadas las temperaturas pasaremos a comparar los resultados con las mediciones realizadas a la salida del Ventidotto A en la Carcel de los Vientos. Estos datos fueron tomados el 9 de Agosto de 2012 desde las 6 hasta las 24h.



La comparativa de los resultados permite observar que el margen de error de la herramienta resulta bastante bajo y permite extrapolar los datos obtenidos a través de la formulación.

Pasaremos ahora a simular las temperaturas de salida del Ventidotto B cuyas condiciones de partida resultarían similares a las del Ventidotto A. Consideraremos la sección B1 en la conexión con Villa Trento Carli y la sección B2 en la conexión con Villa Morlini Trento.

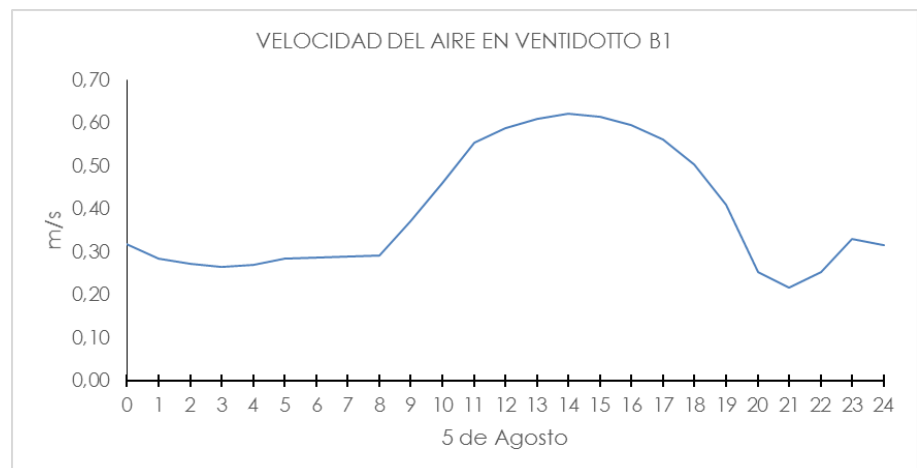


Fig. 3.48. Velocidad del aire obtenidas tras la modelización del ventidotto B1.

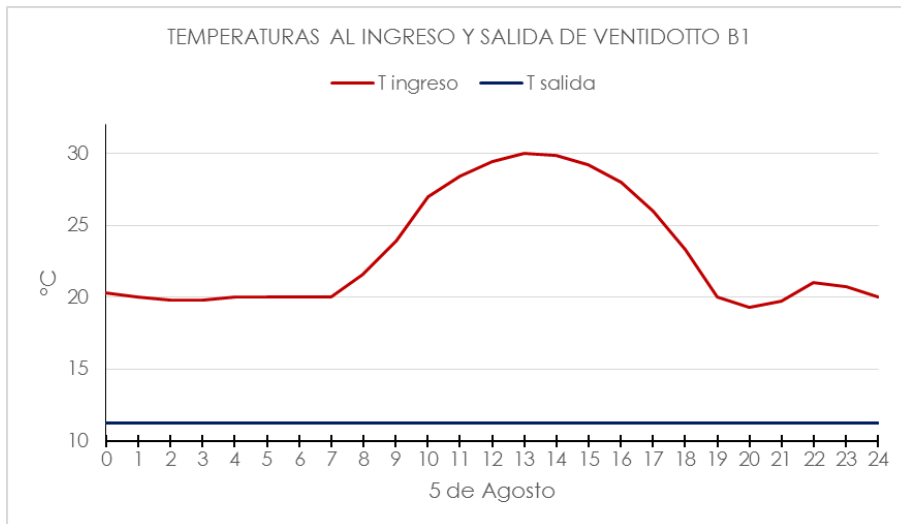
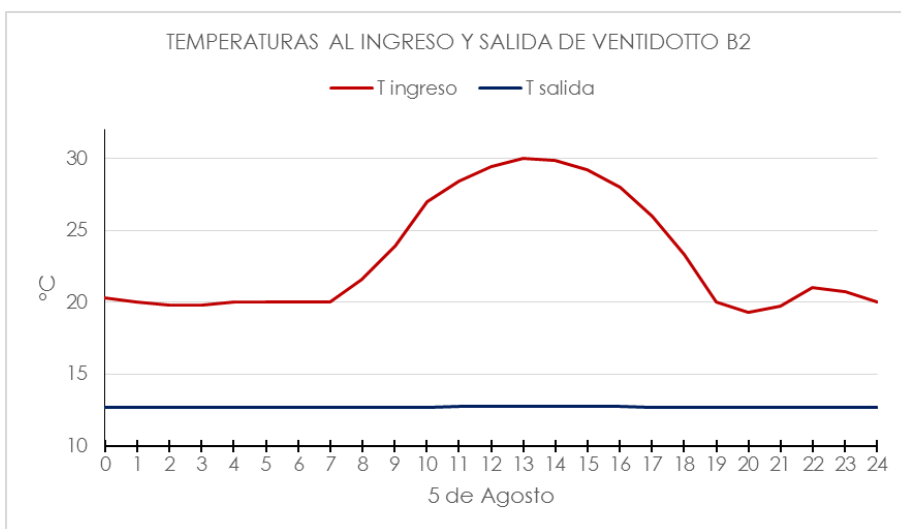


Fig. 3.49 y 3.50 Gráficas de temperaturas obtenidas tras la modelización de los ventidotti B1 y B2.



Y finalmente pasaríamos a calcular las temperaturas del aire a la salida del Covoletto.

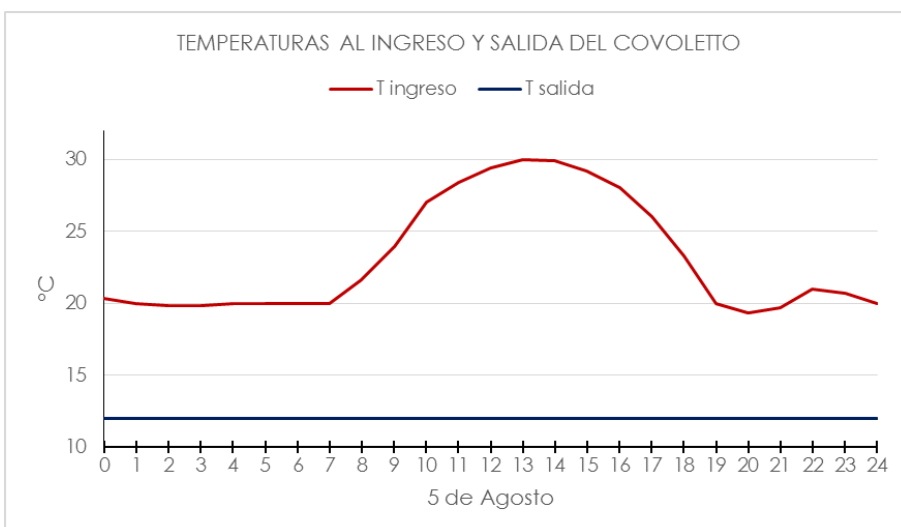


Fig. 3.51. Gráfica obtenida tras la modelización del Covoletto.

De este modo tenemos unas condiciones iniciales de velocidad y temperatura del aire a la salida de los distintos sistemas que serán las condiciones del aire impulsado a las distintas villas.

3.3.2 VILLAS CONECTADAS A VENTIDOTTI



VILLA MORLINI TRENTO

Llegando a Costozza, Villa Morlini Trento es la primera villa que se encuentra a la izquierda. Está insertada entre medianeras entre una hilera de edificios estilísticamente bastante heterogéneos. Comenzándose a construir en el siglo XV, esta fue la primera residencia que la familia Trento tuvo en Costozza, según Cevese³⁰ el edificio tenía que ser originariamente gótico, tal y cómo se percibe en la forma de las ventanas en la fachada posterior (que es la que se encuentra en la vía de acceso). La fachada que abre al jardín responde estéticamente a una restauración bastante radical que se realizó a finales del siglo XVIII, y tiene una composición bastante sencilla. Este edificio ha sufrido numerosas modificaciones entre los siglos XVI y XIX, particularmente durante la segunda mitad del XIX dando a la fachada posterior un aspecto neogótico.³¹

A esta villa llega el extremo del ventidotto B. En este caso, además de la roseta de piedra para la distribución de aire, encontramos unos conductos verticales insertados en las paredes que distribuyen el aire a la planta superior.

En la villa Morlini Trento el flujo de aire se introduce a través de una puerta en el sótano y de aquí se lleva a la parte noble de

↑

→En la página siguiente:
Figs. 3.52, 3.53., y 3.54.
Vistas exteriores de Villa
Morlini Trento.

³⁰ CEVESE R. (1980) Ville della provincia di Vicenza, Rusconi ed., Milano.

³¹ CATALOGO DEL ISTITUTO REGIONALE DE VILLE VENETE. Villa Morlini Trento.

la villa mediante un sistema de conductos verticales introducidos en las paredes. Y a la planta baja mediante una roseta de ventilación. La roseta situada sobre la bóveda del sótano hoy día se encuentra obturada.

La Villa Morlini-Trento es hoy sede de la *Fondazione e Istituto "Mauro Baschirotto"* para el tratamiento de enfermedades raras (B.I.R.D), y en el mismo edificio también se aloja un instituto religioso. Por lo que su acceso es restringido.



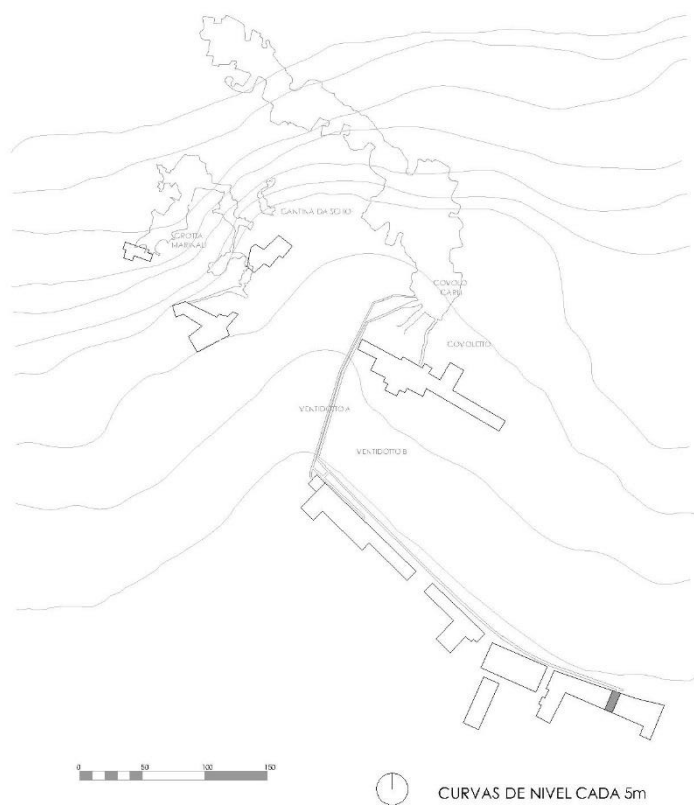


Fig. 3.55. Plano de situación.

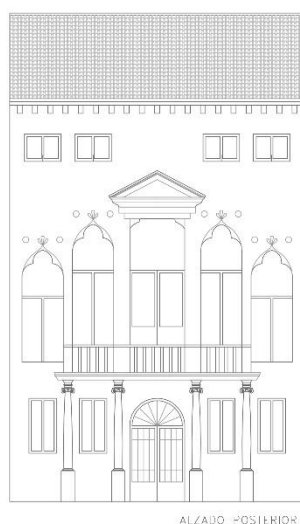
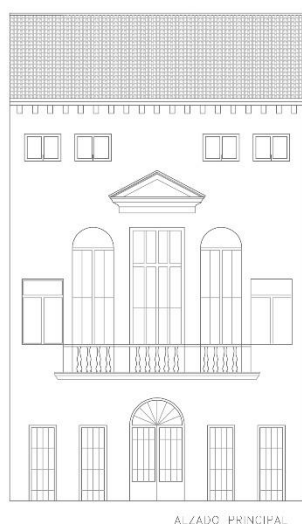


Fig. 3.56. Alzados.

Fig. 3.57. Sección de la villa con el ventidotto B.

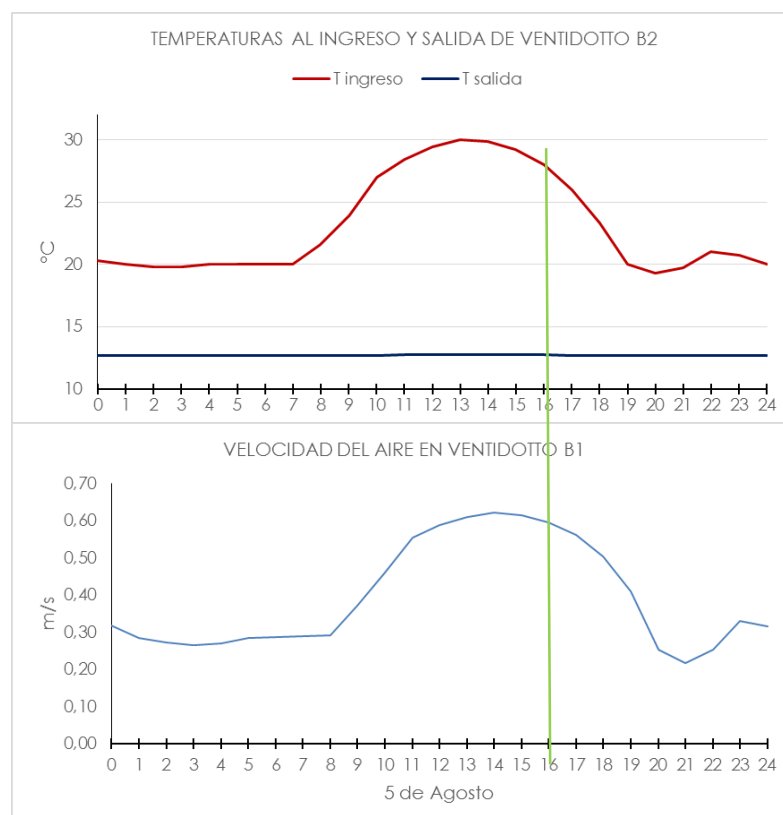


Para el análisis bioclimática necesitamos partir de unas condiciones iniciales de contorno que nos permitan la evaluación fluido dinámica de la misma.

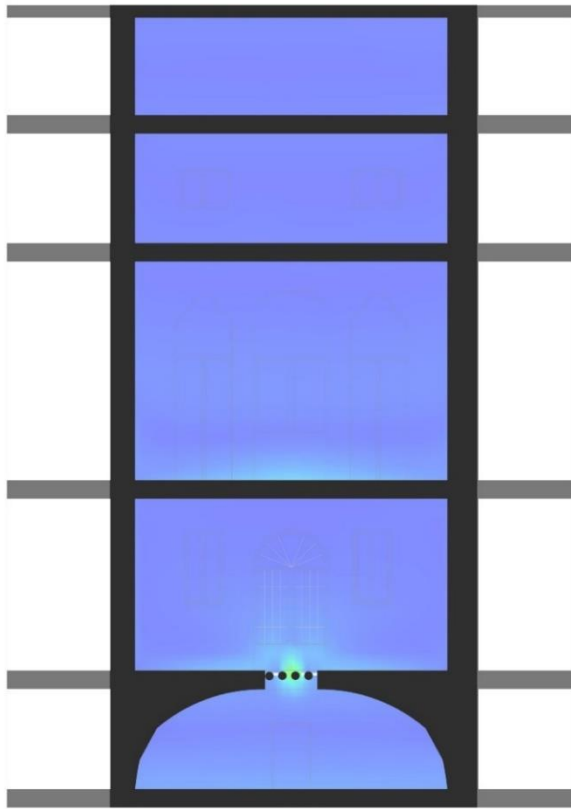
En primer lugar Introduciremos en el programa de cálculo las condiciones climáticas y constructivas del edificio realizando una primera simulación con el motor de cálculo de Energy Plus de las cargas térmicas del mismo. Posteriormente generaremos unas condiciones de contorno a partir de los resultados obtenidos a las que se incorporarán los datos de velocidad y temperatura del aire obtenidos con la herramienta de prediseño de intercambiadores tierra aire para el extremo del ventidotto B. Nos interesa la hora del día en que las temperaturas en el interior de la edificación serían más altas por lo que realizaremos la simulación a las 16h.

Para la modelización CFD partiremos de un mallado de 0,3 metros y se realizará con el modelo de turbulencia k- ϵ .

Fig. 3.58. y 3.59 Condición de contorno de ingreso: Ventidotto B.

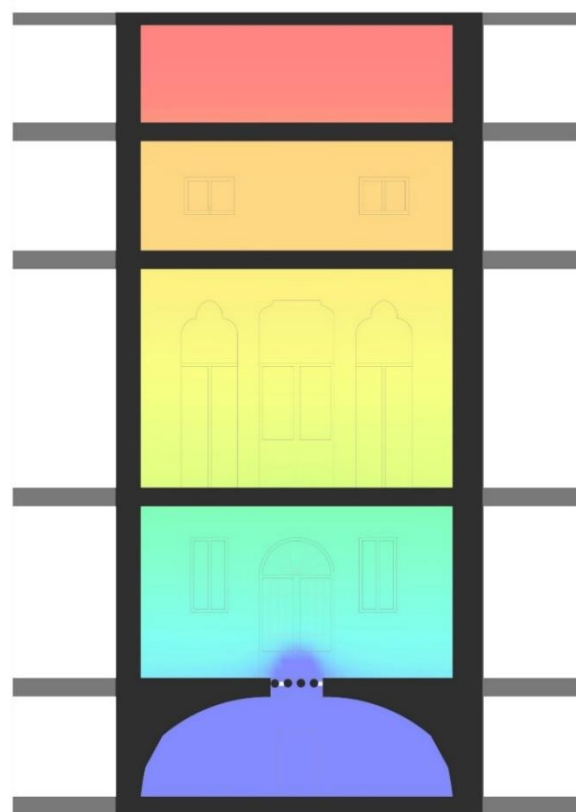
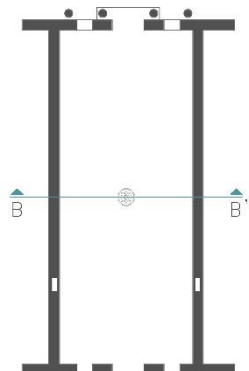
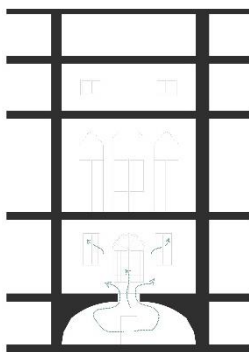


Resultados de la simulación en la sección BB' del edificio. Gráficos de velocidad y Temperatura del aire con el sistema activado.

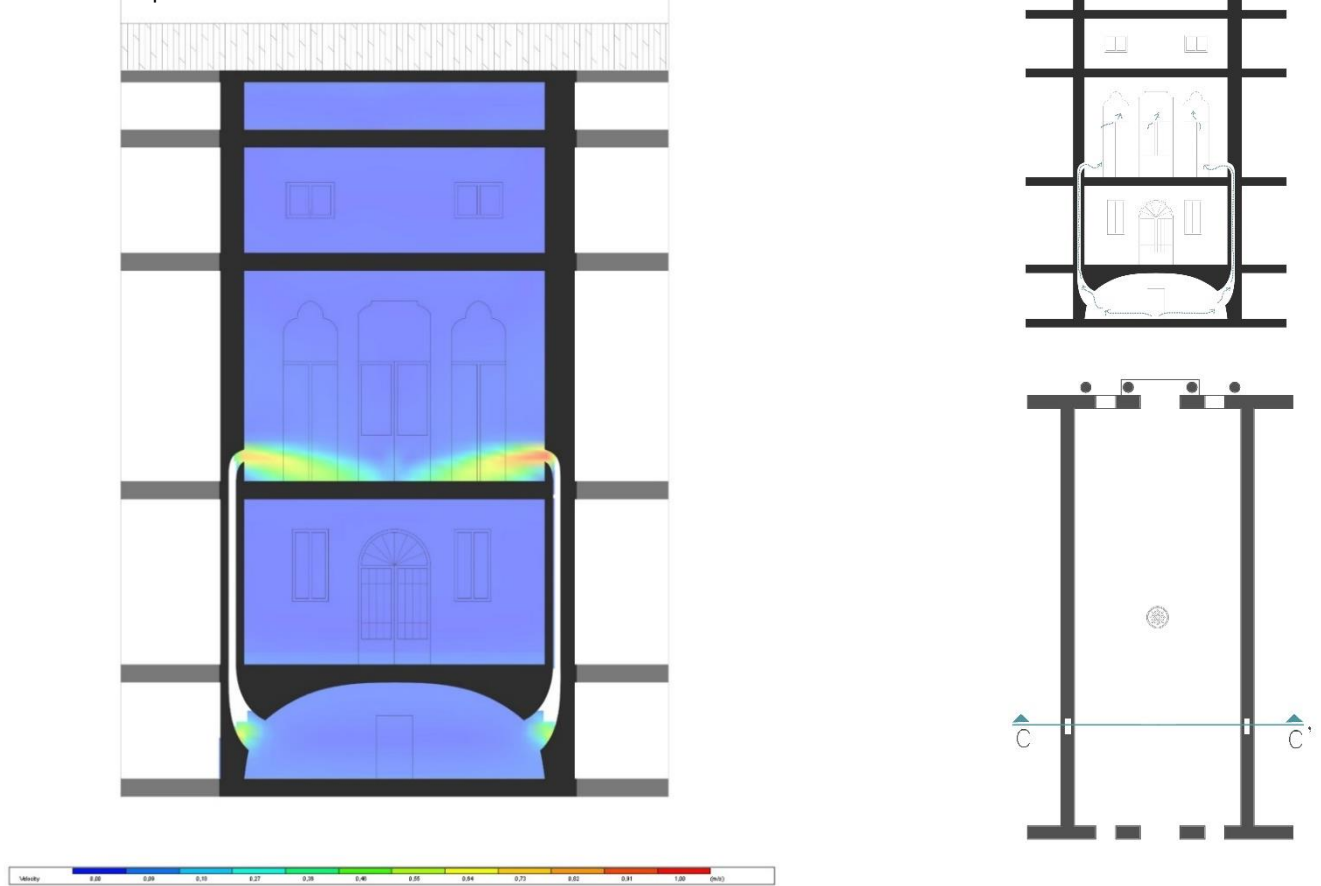


←Fig. 3.60. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección B. Velocidad de aire.

↓Fig. 3.61. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección B. Temperaturas operativas.

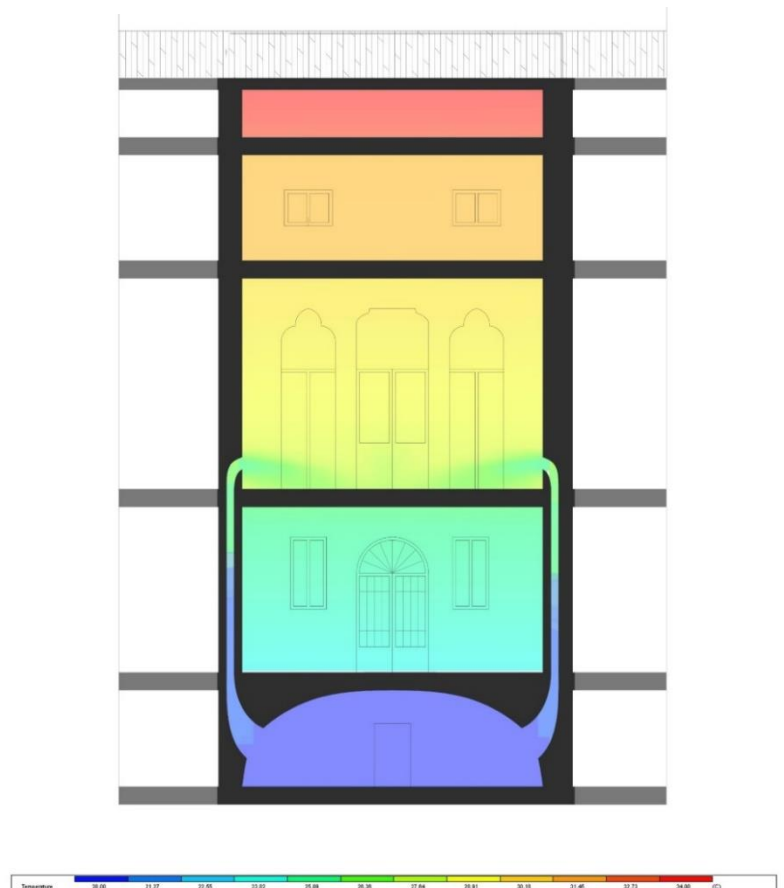


Resultados de la simulación en la sección CC' del edificio. Gráficos de velocidad y Temperatura del aire con el sistema activado.

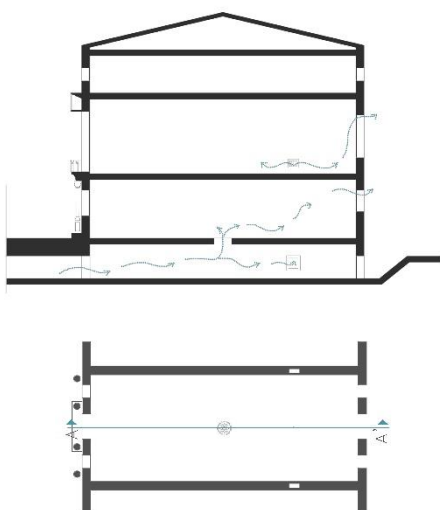
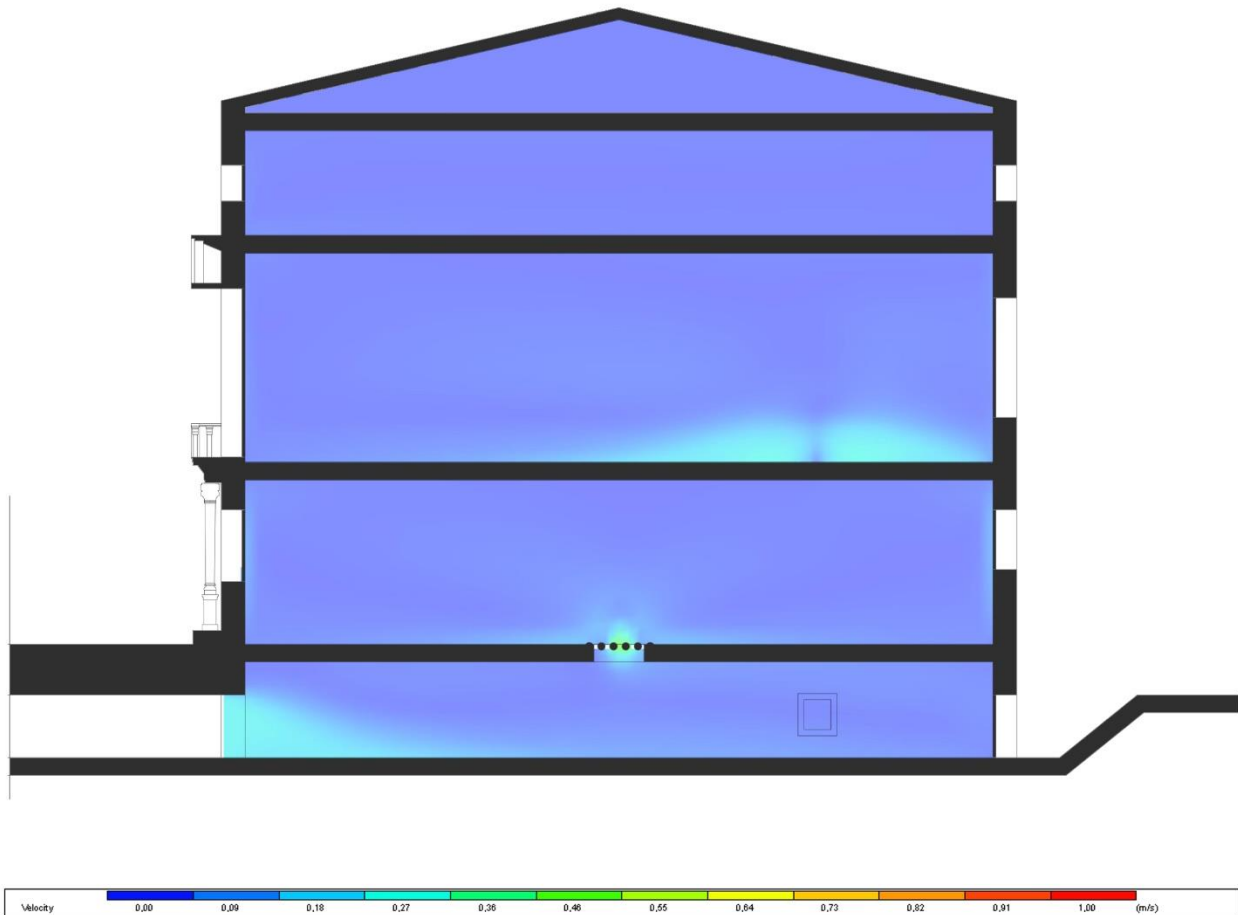


↑Fig. 3.62. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección C. Velocidad de aire.

→Fig. 3.63. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección C. Temperaturas operativas.



Resultados de la simulación en la sección AA' del edificio. Gráficos de velocidad con el sistema activado

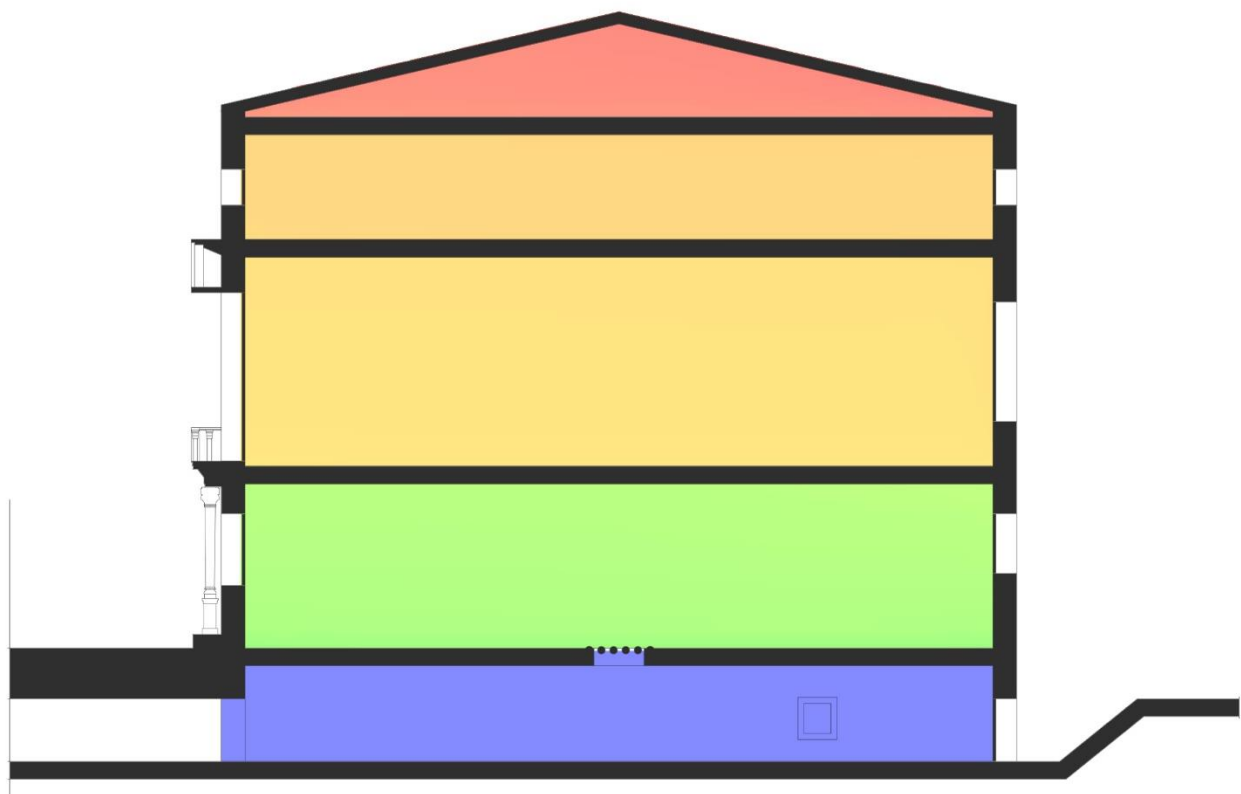
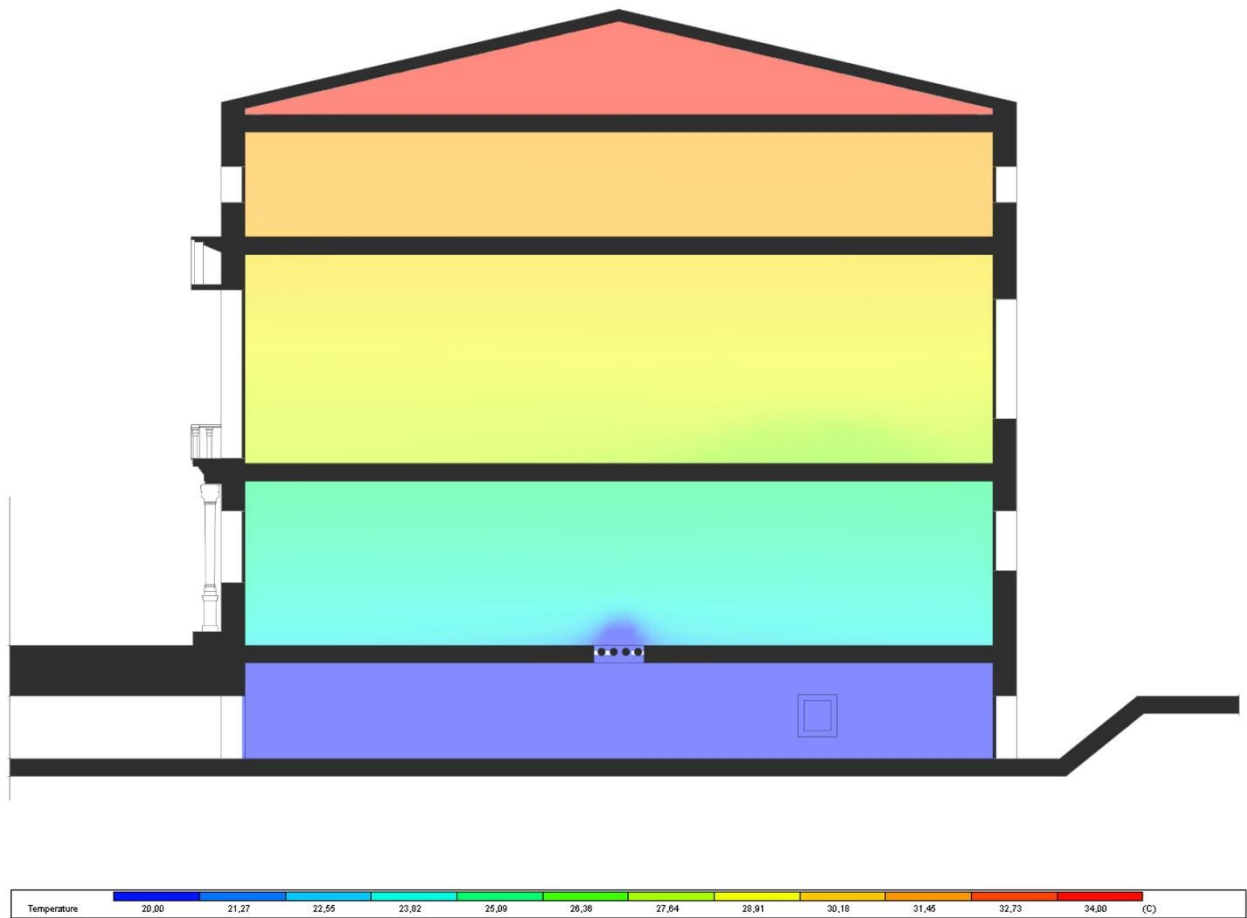


↑Fig. 3.64. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección A.. Velocidad de aire.

→En la página siguiente:
Fig. 3.65. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección A. Temperaturas operativas.

Fig. 3.66. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural anulado. Sección A. Temperaturas operativas.

Resultados de la simulación en la sección AA' del edificio. Gráficos de Temperatura del aire con el sistema activado y desactivado.



Realizamos ahora una comparativa introduciendo los resultados de la simulación en la primera y segunda planta, en el diagrama de confort de Fanger con las limitaciones de la directiva Europea EN-15251, obteniendo los siguientes resultados.

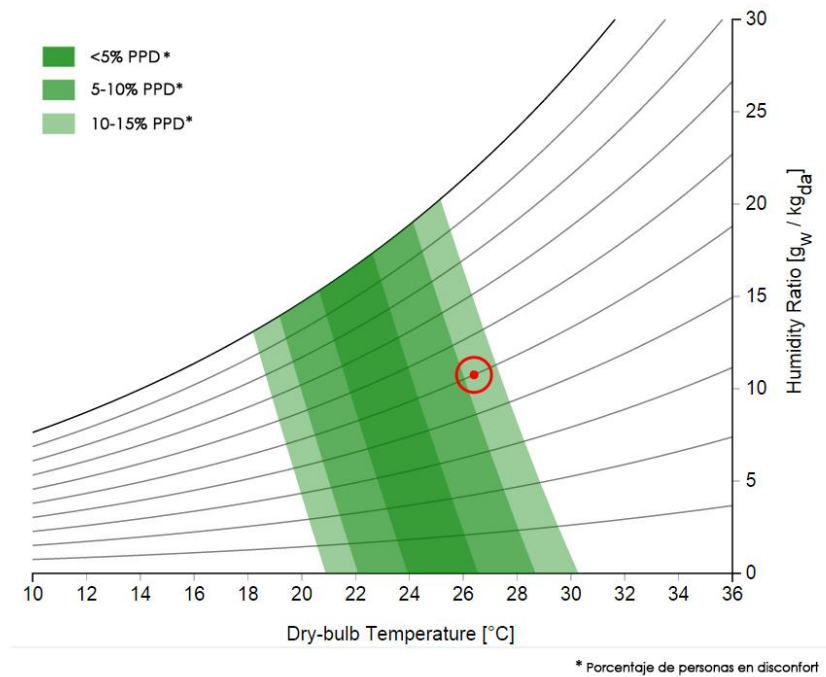


Fig. 3.67. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la primera planta de Villa Morlini Trento sin climatización natural.

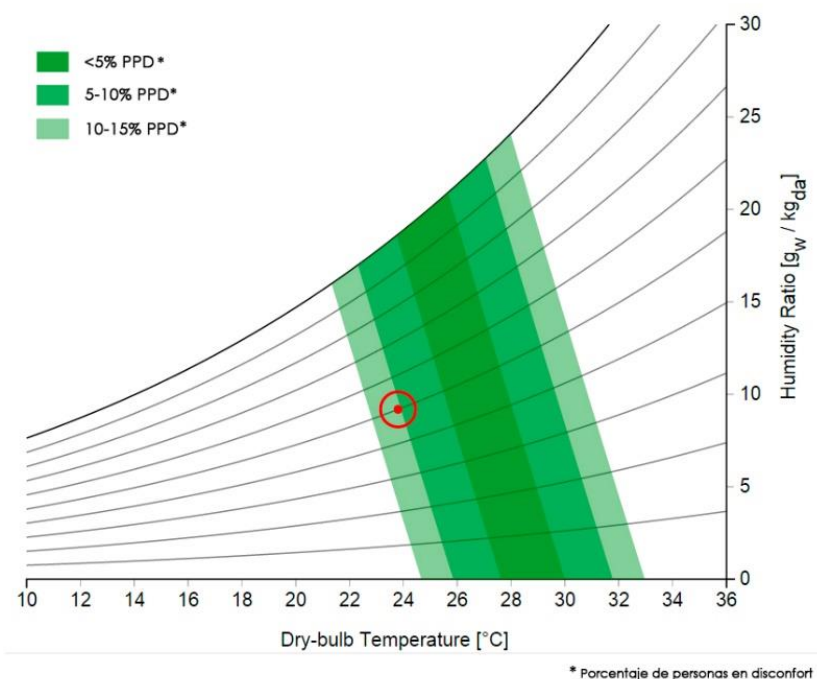


Fig. 3.68. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la primera planta de Villa Morlini Trento con climatización natural.

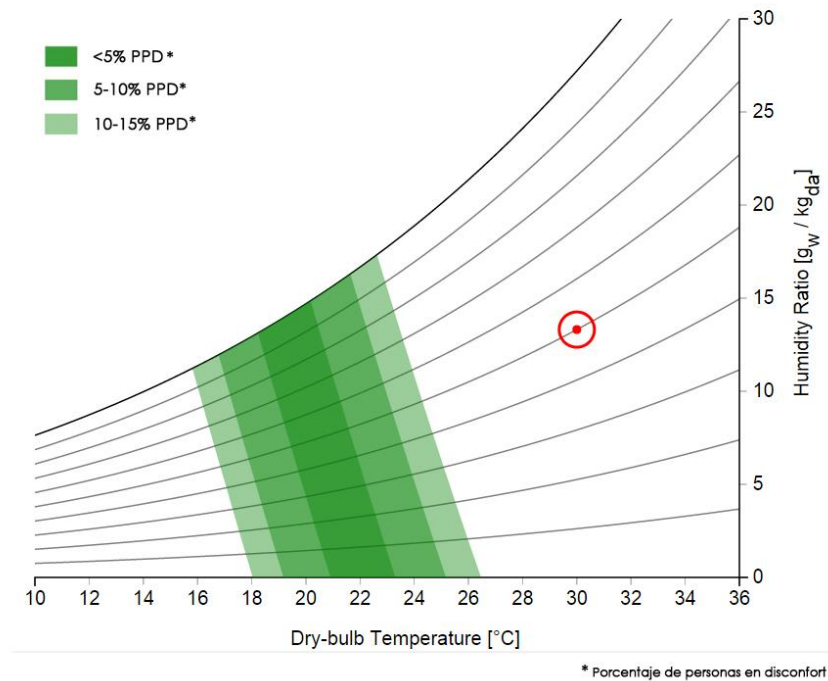
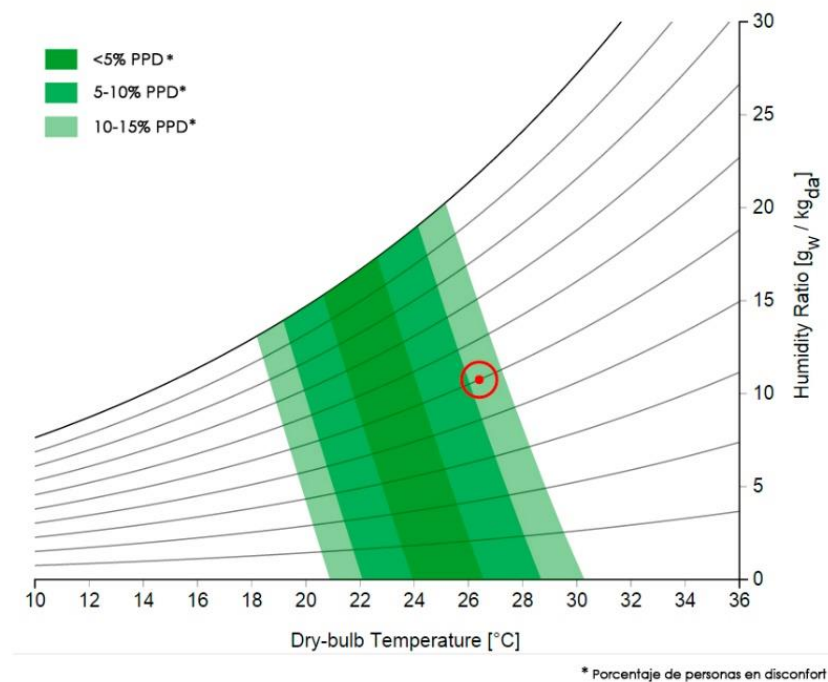


Fig. 3.70. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la segunda planta de Villa Morlini Trento sin climatización natural.

Fig. 3.71. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la segunda planta de Villa Morlini Trento con climatización natural.



Se puede comprobar la eficiencia del sistema de climatización en la segunda planta del edificio, no obstante en la primera planta la sensación térmica puede resultar excesivamente fresca.

Un análisis comparativo de estas gráficas de confort se realizará una vez finalizado el estudio de todas las villas.



VILLA TRENTO CARLI

Se sitúa a la derecha llegando a Costozza, frente a la Iglesia medieval dedicada a San Miguel fue seguramente Alessandro Trento quien entre 1630 y 1645 encargó la ampliación de la residencia al arquitecto Pizzocaro³², modificando la preexistente construcción de origen renacentista el edificio se compone de 4 plantas, el sótano, la planta baja, la planta noble, y buhardilla, se denota la existencia de una pequeña construcción de vigilancia construida durante el Imperio Austro-Hungaro, situada en el ala este enfrente de la entrada hacia el sótano, la fachada posterior tiene una composición similar a la de la fachada anterior sin las ornamentaciones de la segunda y resultando por ello mucho más sencilla. Otra parte, utilizada en el siglo XVII como cocina se separa posteriormente y de forma perpendicular a la villa como si no perteneciera a la misma época de construcción del resto del edificio.

Fig. 3.72. Fachada Posterior.

Fig. 3.73. Fachada Lateral. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.

³² MUSSOLIN, L., M. FELTRE, CLUB SPELEOLOGICO PROTEO-VICENZA. Il Covolo dei venti e il sistema dei ventidotti.

Durante la última guerra, cuando la villa fue utilizada por los alemanes como hospital militar, esta tuvo diferentes modificaciones³³. La distribución y composición de los espacios interiores confirma el origen de su construcción en el siglo XV, subiendo las fastuosas escaleras frontales el primer espacio que encontramos es el salón de entrada donde destacan tanto su artesonado en madera como las tres rejillas de ventilación talladas en piedra que se encuentran en el suelo y a través de los cuales emana el aire de las grutas. Las dos rejillas laterales de forma rectangular son de origen bizantino y la tercero, situado en el centro de la sala y de forma ovalada, y con un diseño más

Fig. 3.74. Fachada Principal.



³³ Ibid. 32

excepcional es probablemente renacentista. La puerta de la derecha nos conduce hacia la sala del covoletto, llamada de esa forma por el conducto artificial que la conecta directamente a la gruta. El techo de esta sala podría datarse del siglo XV, aunque hay modificaciones que parecen ser del XVI. Sobre la puerta que lleva al covoletto junto al escudo de la familia Trento del siglo XV encontramos una inscripción en italiano antiguo.

QUI DELLA REA CANICOLA

IL FOCO NON IMPERA:

SOLO VI SPIRA PLACIDA

ETERNA PRIMAVERA

Aquí el fuego de la real canicula no impera, sólo se respira eterna primavera.

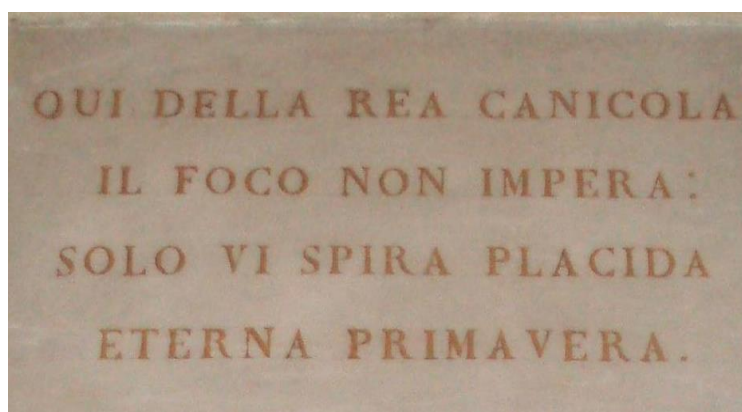
En la parte trasera de esta villa se encuentra el acceso al Covoletto dei Venti (Cueva de los vientos) protegido por una reja.

El sistema de climatización de Villa Trento Carli hoy tiene un funcionamiento muy limitado debido a las modificaciones que ha sufrido el edificio. La comunicación del almacén con la gruta ha sido cerrado y del conducto de comunicación con el ventidotti sólo queda un hueco de 10x12 centímetros, muy escondido entre los estantes del mismo.

Fig. 3.75. Escaleras de acceso al Covoletto.

Fig. 3.76. Inscripción en italiano antiguo sobre la puerta del Covoletto.

→ En la página siguiente:
Fig. 3.77. Vista interior de la Sala del Covoletto.





Las rosetas de las salas laterales fueron cerradas a finales del siglo XIX, hoy día no queda rastro de las mismas. Sólo se conservan las tres del salón principal, que hoy día tampoco están en funcionamiento. Este sistema se estuvo utilizando hasta principios del siglo XX aunque el aire que salía de los mismos resultaba excesivo y se optaba por mitigarlo cubriéndolos con alfombras.

El único espacio que se mantiene en uso es la sala del Covoletto, comunicada directamente con el cóvolo de los vientos mediante una puerta. Aunque hoy día el antiguo sistema está prácticamente en desuso, en los días de verano de altas temperaturas desde la entrada de la gruta emana aire fresco llegando a refrescar no sólo la planta baja, sino también la planta noble.

Durante unos trabajos de restauración del Arquitecto Luciano Mingotto, se descubren unos canales de ventilación verticales insertados en los muros, que pudieran funcionar del mismo modo que los canales que se encuentran en la Villa Morlini Trento. Estos últimos canales no se han tenido en cuenta para la modelización de la villa ya que no aparecen referenciados en fuentes gráficas y bibliográficas consultadas y por tanto no tenemos constancia de que fueran diseñados dentro de la totalidad del sistema.

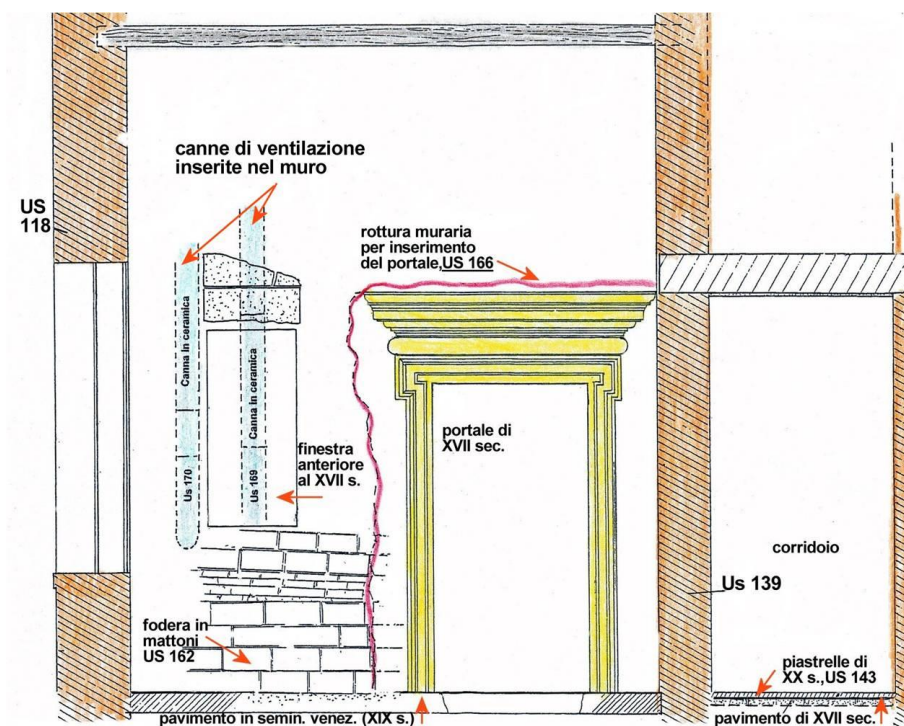
Se analizarán, en primer lugar, tanto el ventidotto que llega a la Villa como el covoletto.

→En la página siguiente:
Fig. 3.78. Salón Principal
de la Villa.

↓↘↙
Figs. 3.79., 3.80. y 3.81
Rejillas de Ventilación en
el Salón Principal.







Figs. 3.82 y 3.83 Detalle de los conductos verticales de ventilación insertos en los muros de la Villa. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.



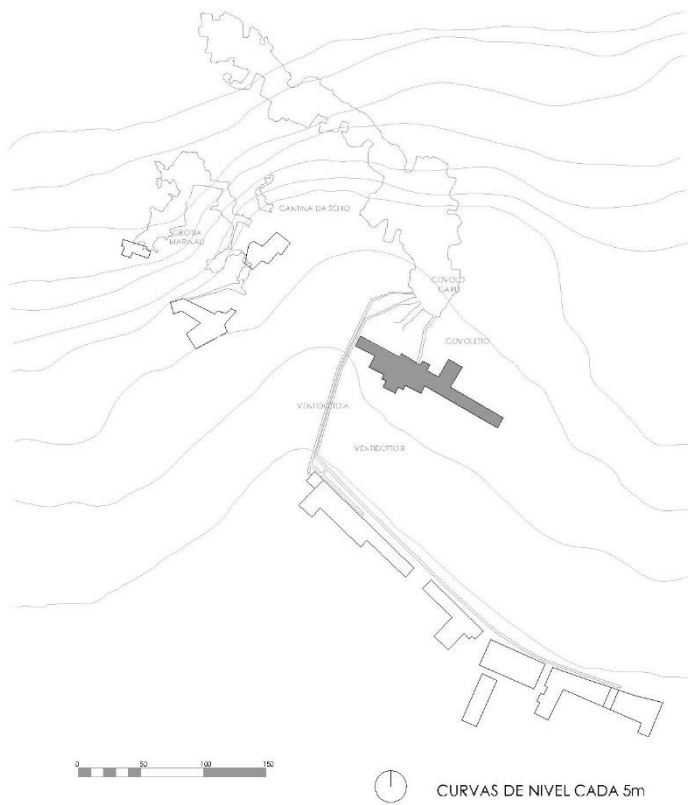
Fig. 3.87. Entrada a Grotta Carli.



Fig. 3.88. Interior de Grotta Carli.

Fig. 3.89. Vista de la pared del sótano de la Villa en la que se encontraba la antigua conexión con el Ventidotto B. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.





:

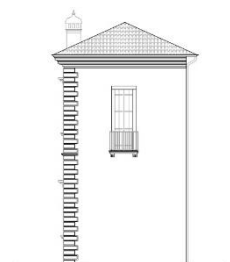
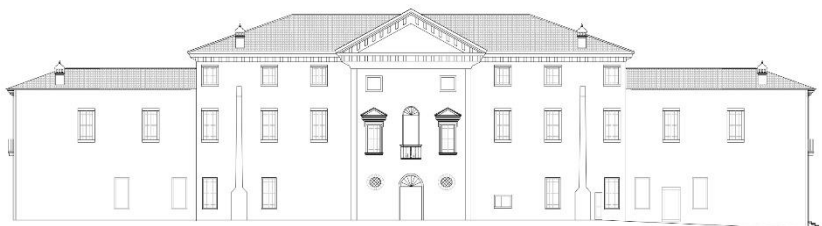
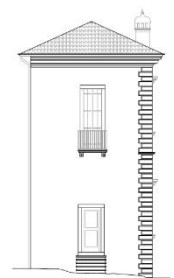
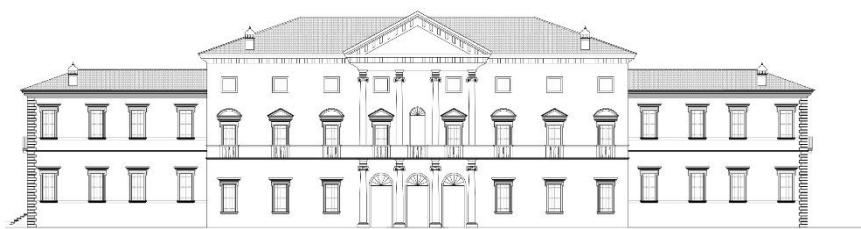
←

Fig. 3.90. Plano de situación.

↙↘

Figs. 3.91., 3.92, 3.93 y 3.94 Alzados.

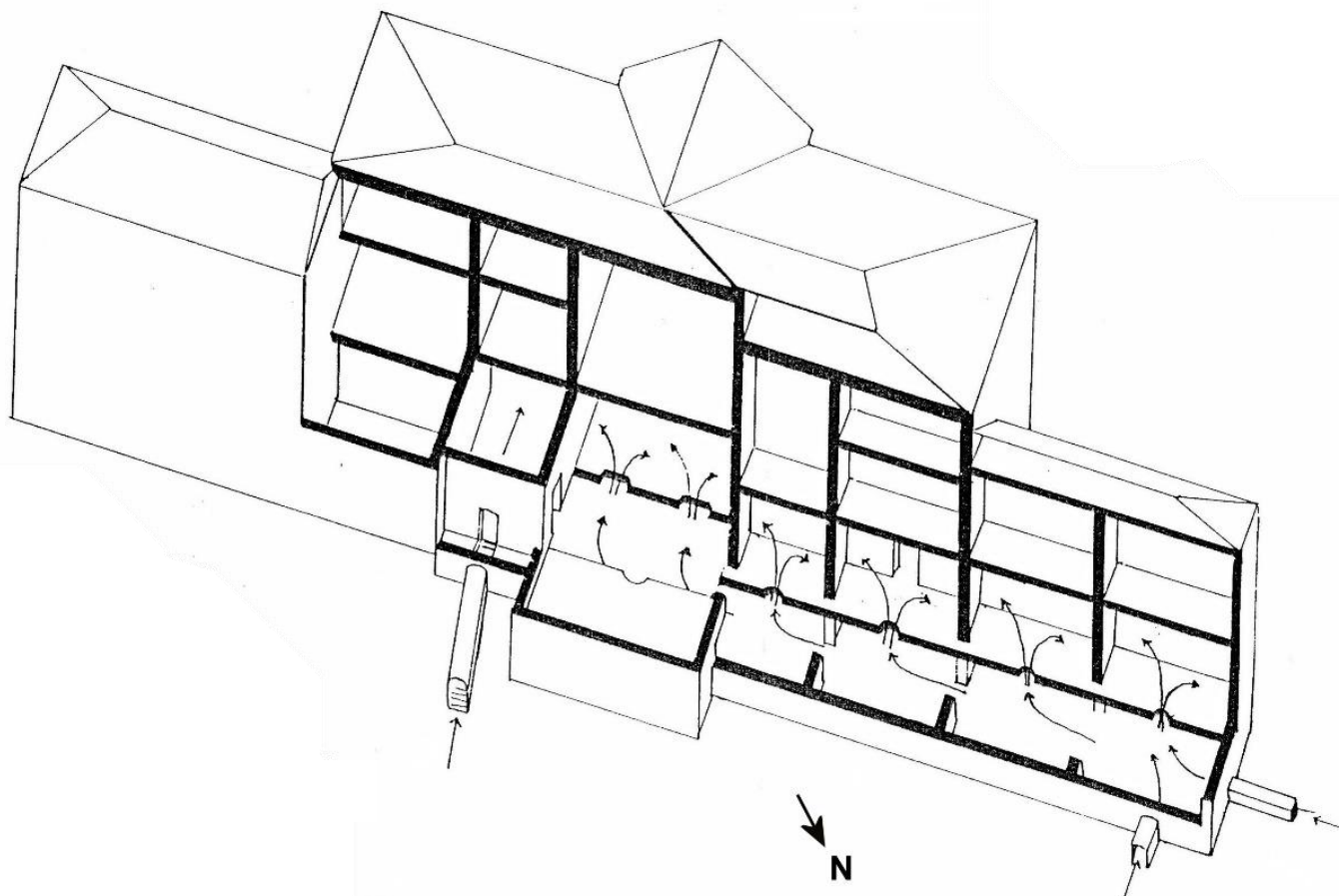
→ En la página siguiente:
Fig. 3.95. Esquema de funcionamiento del sistema de climatización natural de Villa Trento Carli.



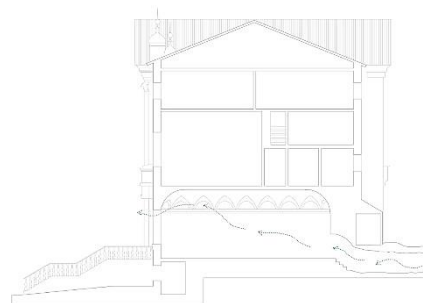
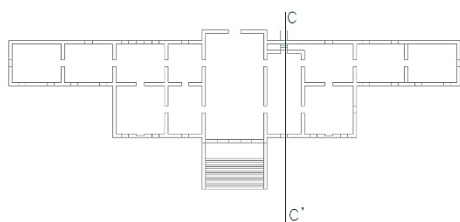
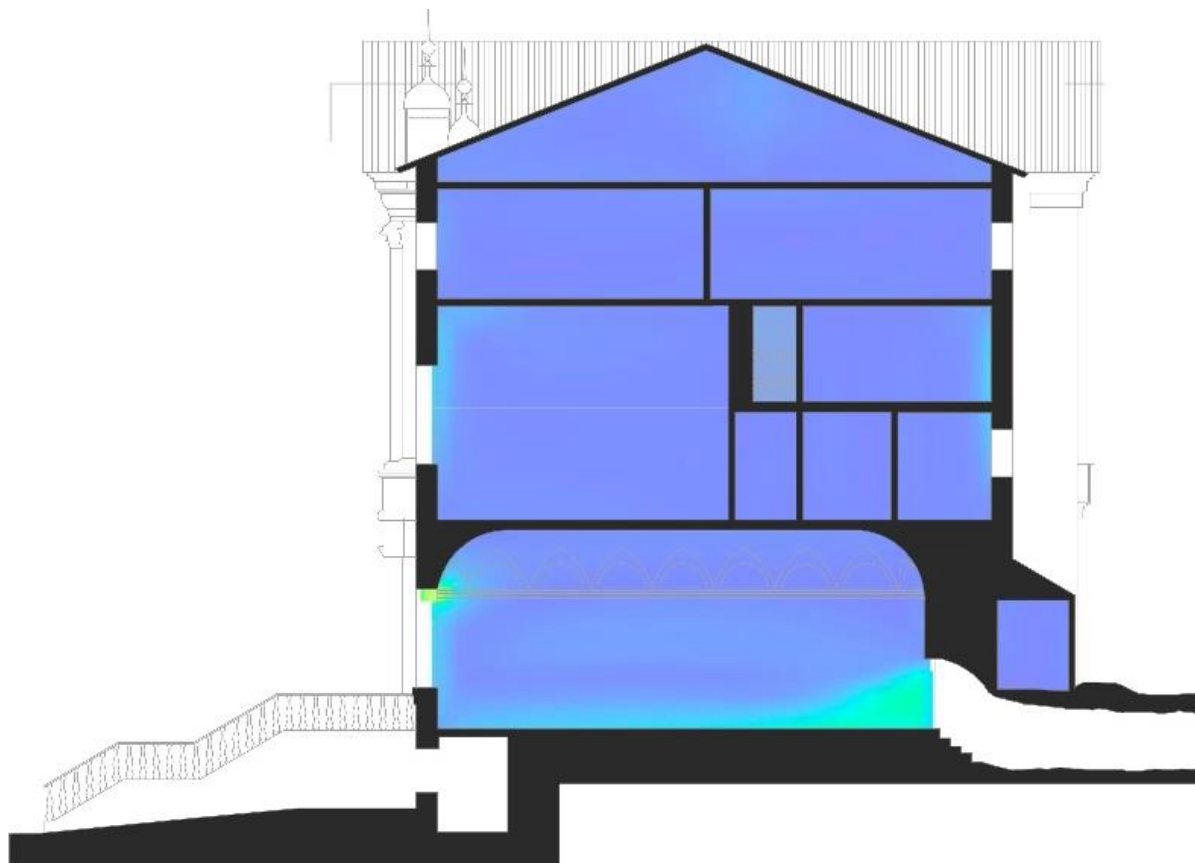
Como ya se ha mencionado, Villa Trento Carli se encuentra vinculada al ventidotto B en su sección B1 y al Covoletto, por lo que retomaremos los datos obtenidos de estas simulaciones para incorporarlos a las condiciones de contorno para la modelización CFD.

Una vez finalizada la modelización estudiaremos por separado la Sala del Covoletto, El Salón Central con las tres rejillas de ventilación y las salas conectadas al Ventidotto B.

A continuación aportamos los gráficos CFD obtenidos así como los diagramas de confort de Fanger que se extraerían de los mismos. Al igual que para el caso de la Villa Morlini Trento los resultados obtenidos se analizarán con el resto de las villas.



Resultados de la simulación CFD en la Sala del covoletto. Gráficos de velocidad y Temperatura del aire con el sistema activado y desactivado.



←

Fig. 3.96. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección C, Sala del Covoletto.. Velocidad de aire.

↙

Fig. 3.97. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección C, Sala del Covoletto. Temperaturas operativas.

→

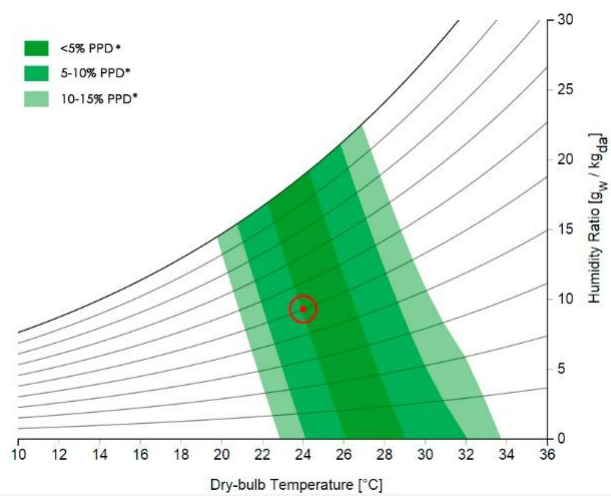
Fig. 3.98. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural anulado. Sección C, Sala del Covoletto. Temperaturas operativas.

↓

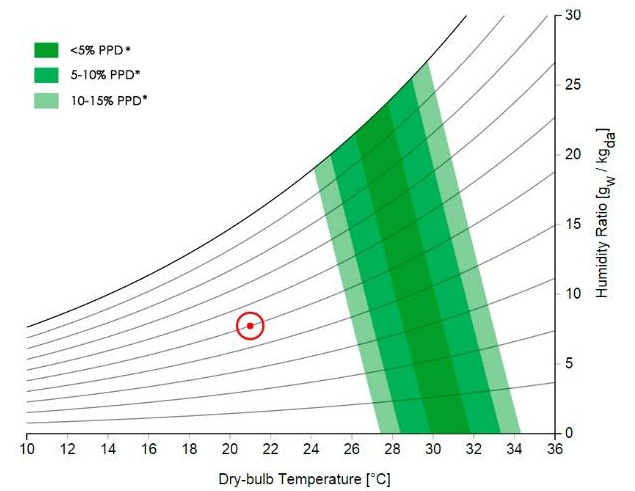
Fig. 3.99. Gráfica de Confort de Fanger para la Sala del Covoletto sin climatización natural.

↘

Fig. 3.100. Gráfica de Confort de Fanger para la Sala del Covoletto con climatización natural.



* Porcentaje de personas en discomfort



* Porcentaje de personas en discomfort

Resultados de la simulación CFD en Salón Principal. Gráficos de velocidad y Temperatura del aire con el sistema activado y desactivado.

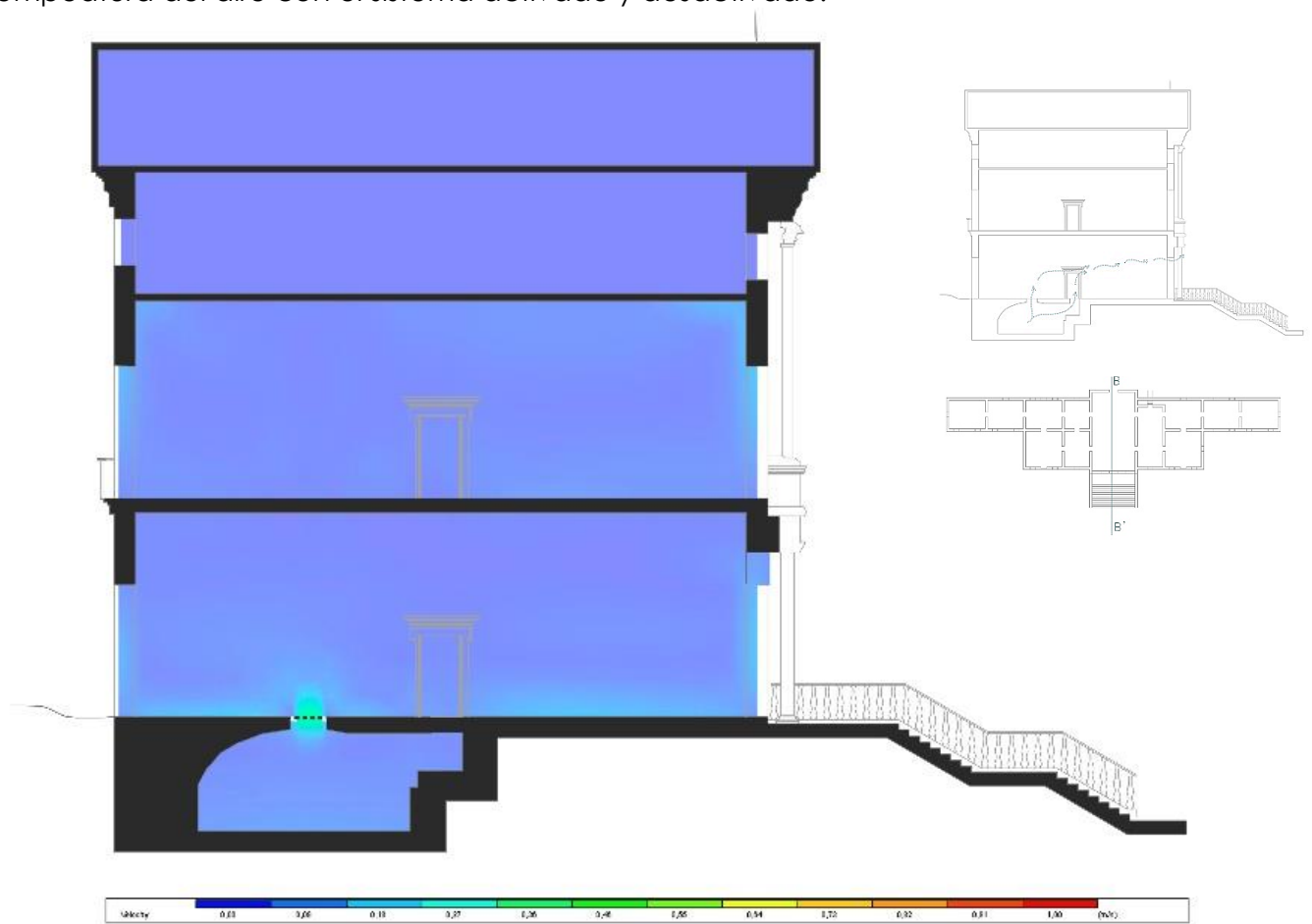


Fig. 3.101. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección B, Salón Principal.. Velocidad de aire.

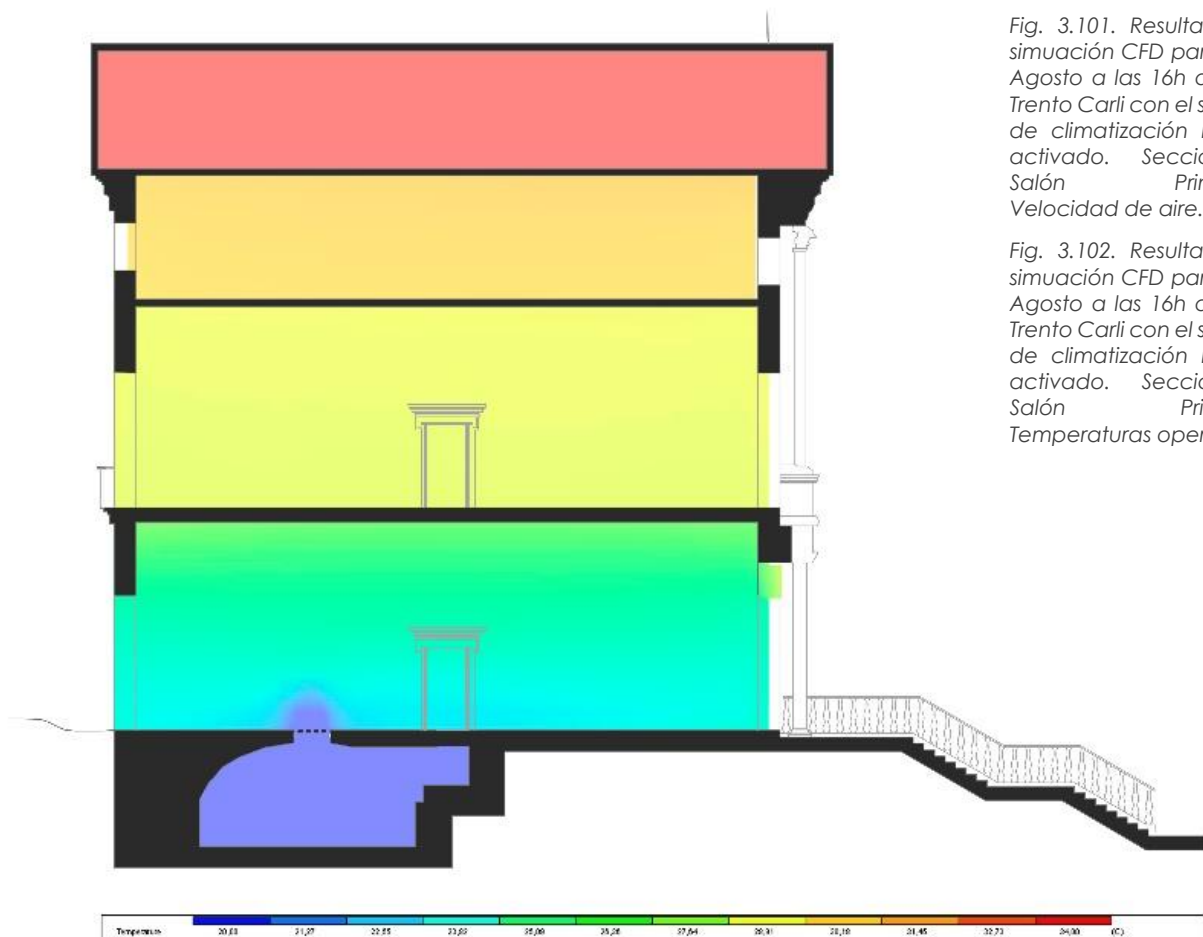


Fig. 3.102. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección B, Salón Principal.. Temperaturas operativas.

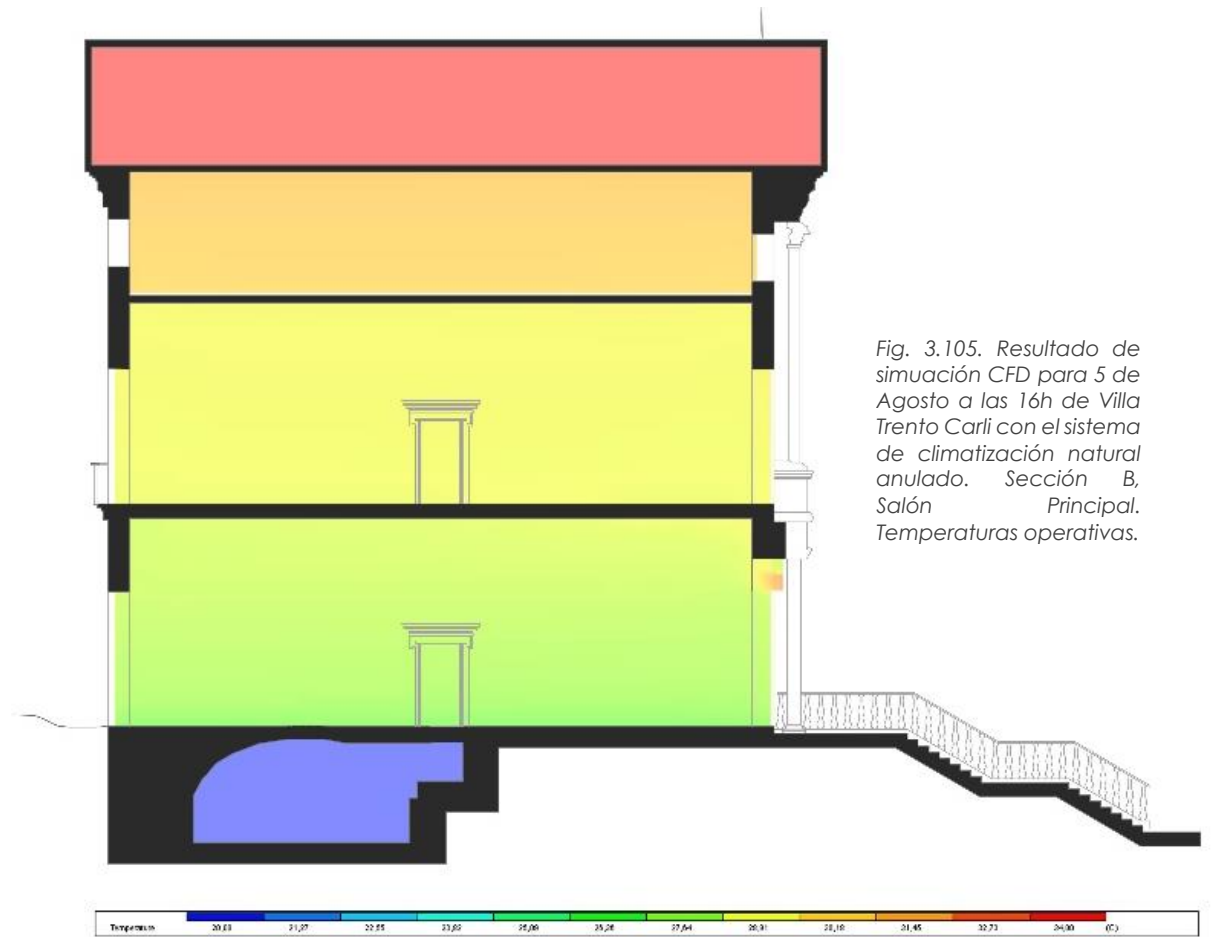
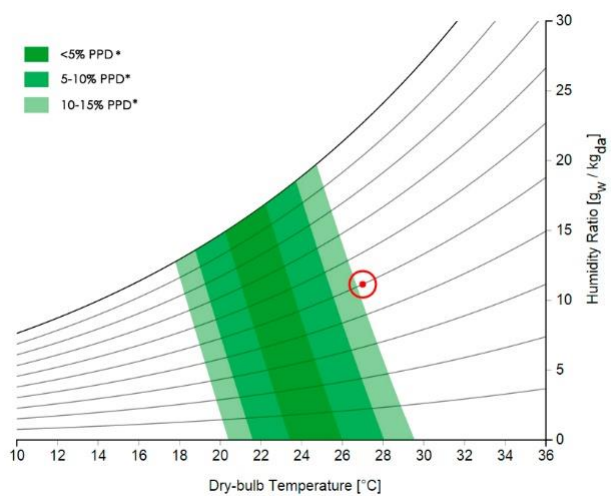
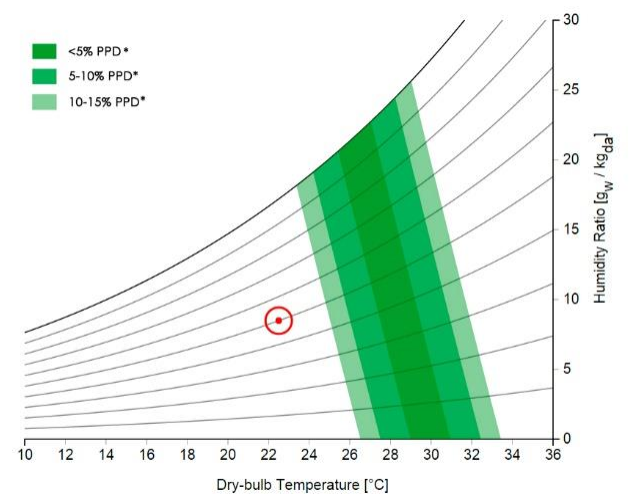


Fig. 3.103. Gráfica de Confort de Fanger para la Salón Principal sin climatización natural.

Fig. 3.104. Gráfica de Confort de Fanger para la Salón Principal con climatización natural.



* Porcentaje de personas en discomfort



* Porcentaje de personas en discomfort

Resultados de la simulación CFD en la sección AA' del edificio. Gráficos de velocidad y Temperatura del aire con el sistema activado.

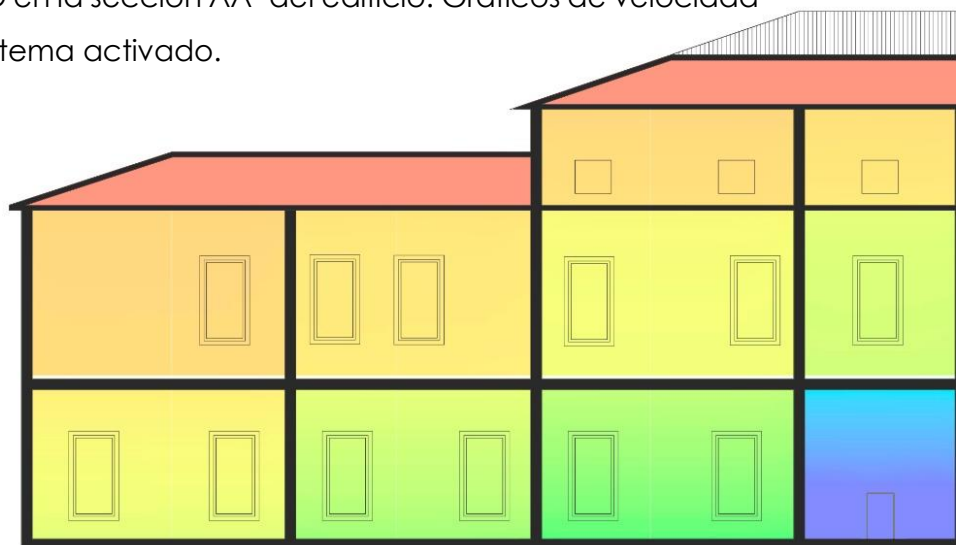
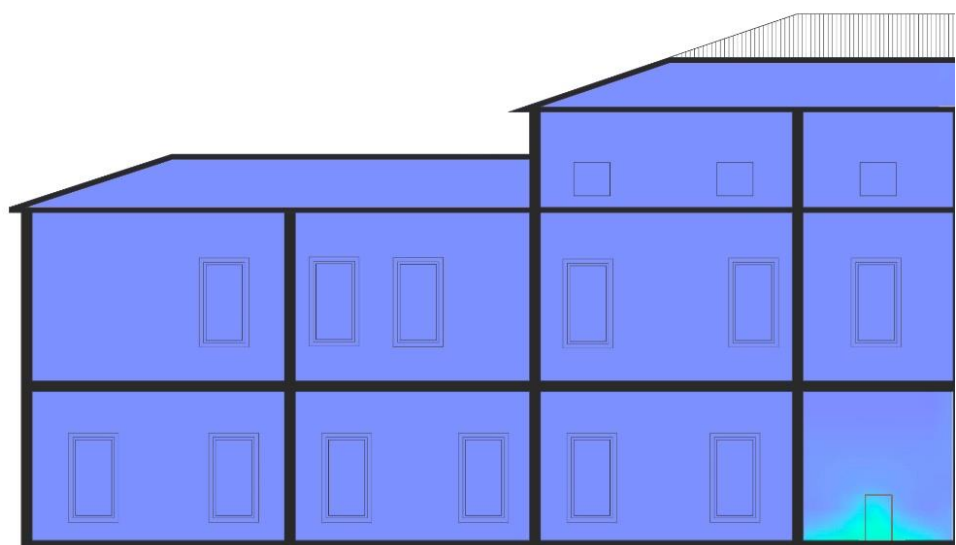
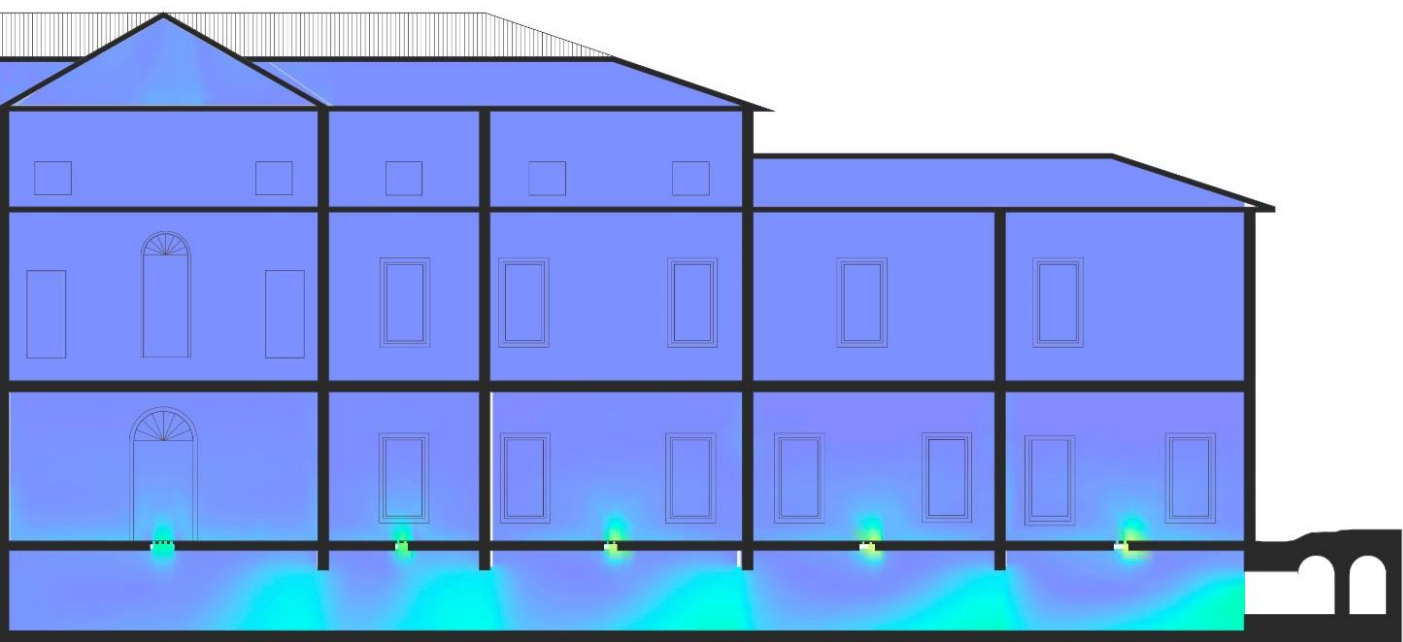
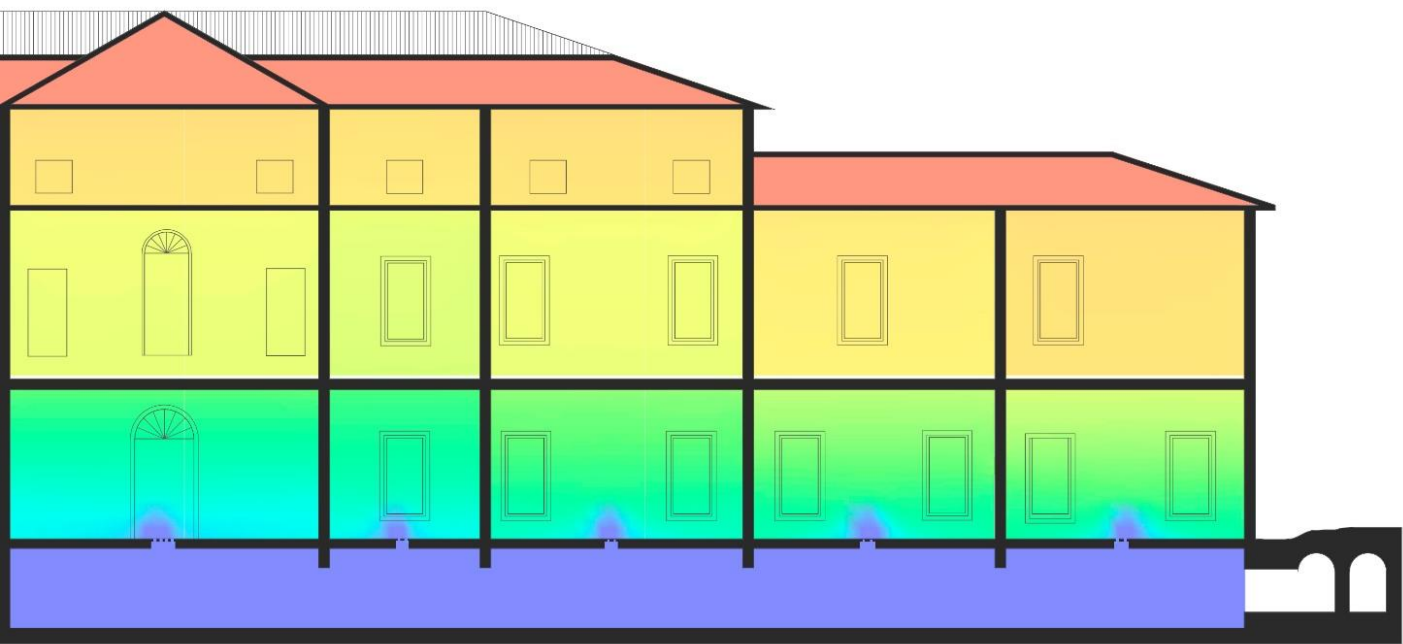


Fig. 3.106. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección A, .. Temperaturas operativas.

Fig. 3.107. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección A, .. Velocidad de aire.





Resultados de la simulación CFD en la sección AA' del edificio. Gráficos de temperatura del aire con el sistema desactivado.

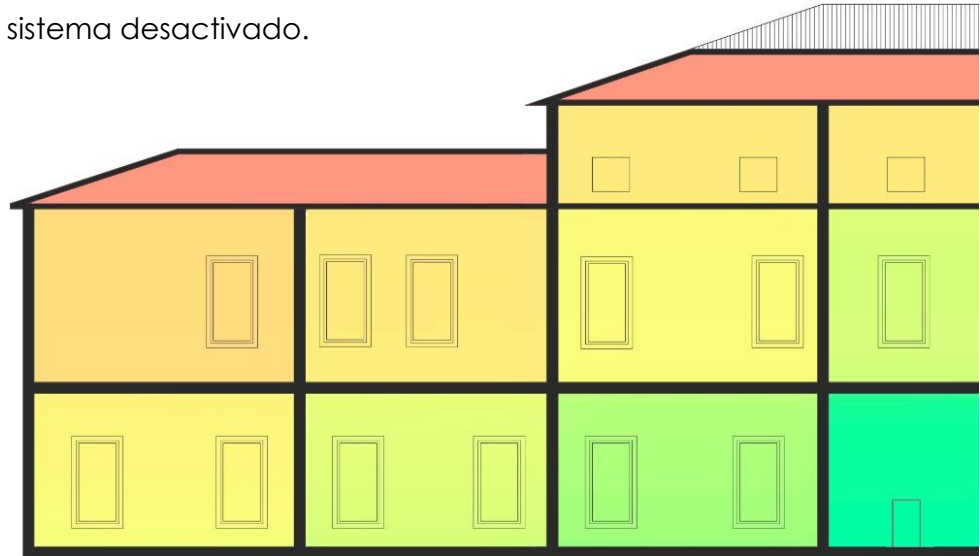
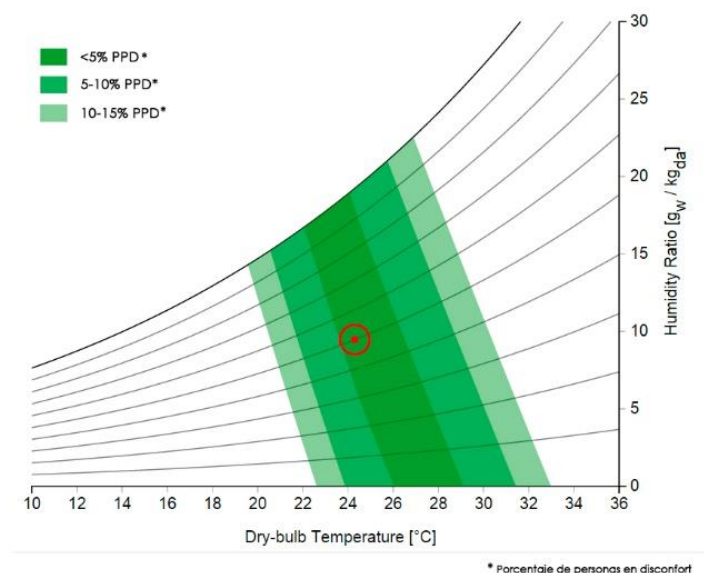
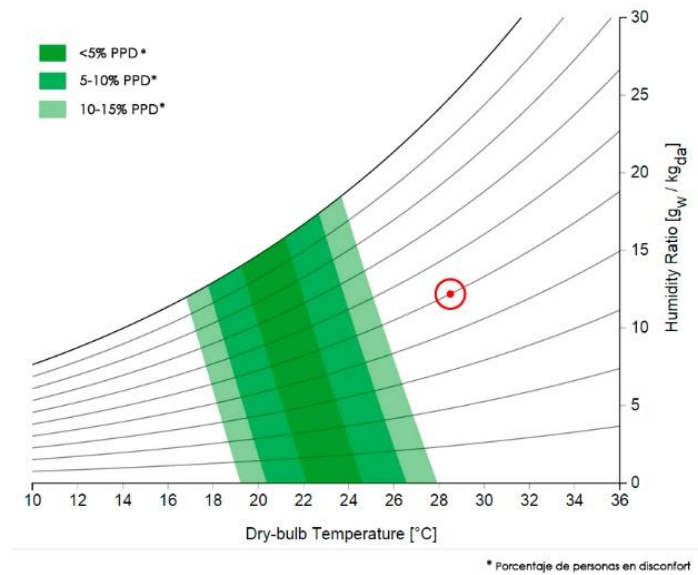
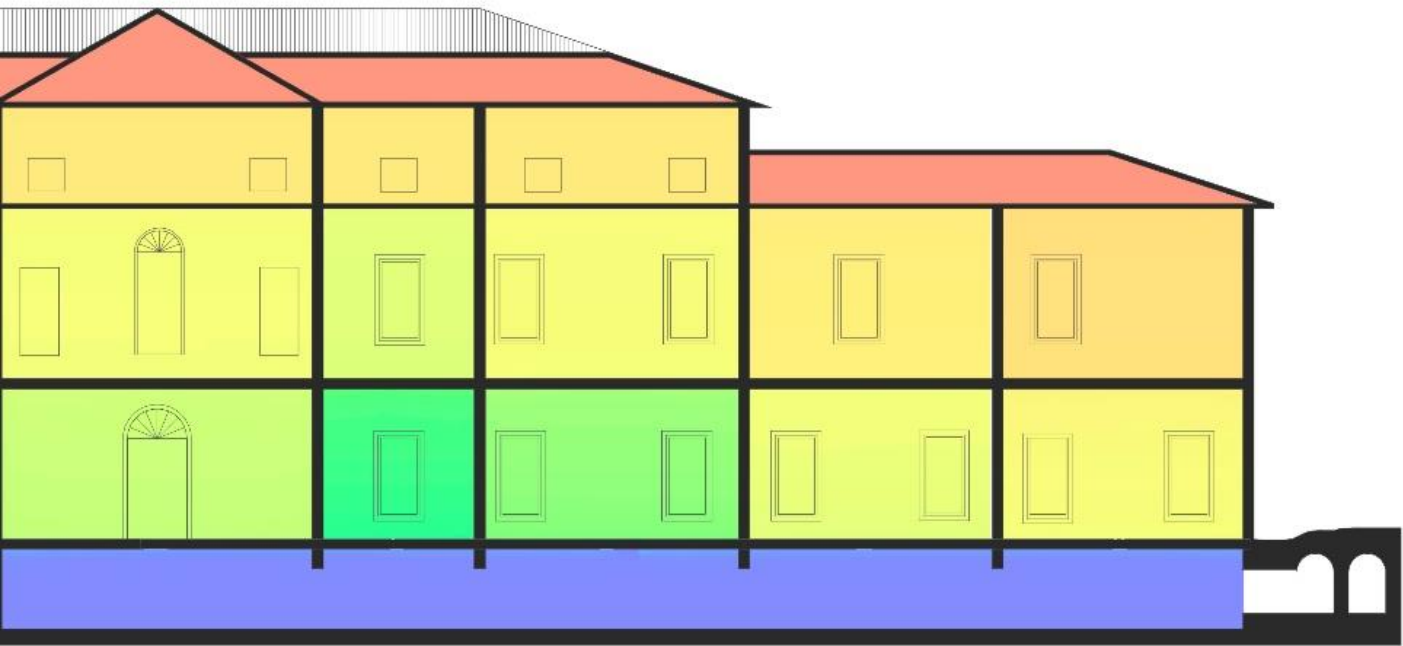


Fig. 3.108. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural anulado. Sección A. Temperaturas operativas.

Fig. 3.109. Gráfica de Confort de Fanger para las Salas laterales con climatización natural.

Fig. 3.110. Gráfica de Confort de Fanger para la las Salas laterales sin climatización natural.









VILLA EOLIA

En 1560 Francesco Trento comienza la construcción de la Villa Eolia, sobre la base de la antigua caballeriza de la villa familiar de Costozza.³⁴

Este pabellón de forma cúbica se encuentra entre las dos villas adyacentes de Costozza: las hoy llamadas Villa Trento-Da Schio y Villa Trento-Carli. El piso inferior conservaba los establos para los caballos, mientras que el piso superior consistía en un salón para descanso y para que los viajeros experimentaran el frescor del aire que subía por la roseta de piedra situada en el centro de esa única sala³⁵. El nombre de Æolia proviene del dios griego del viento, Eolo (Æolus en latín).

Su arquitectura se superpone a la geometría octogonal de la rosa de los vientos y frente a una imagen exterior modesta alberga un opulento interior. En el centro de la cripta de la villa hay un antiguo mosaico romano octogonal, encima de este

←↑↗

Figs. 3.111. , 3.112 y 3.113.,
Vistas del Exterior de Villa
Eolia.

³⁴ CATALOGO DEL ISTITUTO REGIONALE DEI VILLE VENETE. Villa Eolia.

³⁵ MACCÀ' G. (1799) Storia della famosa grotta detta volgarmente il Covolo, o Covalo di Costozza dedicata all'antico e nobile collegio de' sigg. Notaj di Vicenza, pp. XXII-104, Giovanni Rossi, Vicenza; rist. 1989, Cartolibreria Pederiva, Grancona (Vi).



Figs. 3.114., 3.115., 3.116., 3.117., 3.118., 3.119., 3.120. y 3.121 Grabados con los nombres de los 8 vientos que se encuentran en la Carcel de los Vientos (o bodega de Villa Eolia)

encontramos una rejilla octogonal de piedra centrada en el piso de la sala Eolia y por último un octógono centrado en la cúpula de la villa. La cámara subterránea contiene ocho hornacinas en que están tallados los nombres de los ocho vientos locales; Borea. Euro, Sirocho, Austria, Garbin, Zefiro, Maestro y Tramot. Esta rosa de vientos octogonal corresponde a las ocho imágenes de dioses míticos, representada en siete planetas y una alegoría del amor mediante frescos de la cúpula de la sala de Eolia. Las imágenes convergen hacia una figura central de Prometeo. El Prometeo mitológico - portador del fuego a la humanidad - está relacionado con las teorías antiguas sobre el pneuma, que fue relacionado por algunos filósofos con los incendios. Cleantes (siglo III a C), por ejemplo, describe el pneuma como un soplo de fuego que, en forma de rayos de sol, penetró en el cosmos para proporcionar la vida, del mismo modo, Séneca sostenía que el alma humana nació de un incendio de constelaciones. En la antigua Grecia, el aire y el fuego tenían un lugar preponderante y fueron vinculados con el espíritu que se convirtió en una fuerza mundial e incluso una razón divina de vida. Prometeo porta la antorcha como una representación del pneuma que a la vez alude a templar los vientos y la temperatura ideal de la sala, así como a la

Fig. 3.122. Roseta de Ventilación que une la Cárcel de los Vientos con el salón principal.

Fig. 3.123. Salón Principal de la Villa.



proporción armoniosa y la unión de las artes (y la ciencia) empleados en Eolia.

Los frescos de alrededor de 1570 que se encuentran en el cielorraso están dedicados al viento y a Eolo, son las obras de Francesco B. Zelotti y Gian Antonio Fasolo, discípulos del Veronese. Estos frescos representan los planetas, el sistema solar y las constelaciones zodiacales. Los cuatros nichos en el salón representan a las cuatro estaciones. En el centro de la cúpula Eolo reina supremo. También hay frescos de Giambattista Maganza el Viejo (1509-1586). Y originalmente las paredes se encontraban cubiertas por frescos pintados por Mantegna, pero ahora se encuentran cubiertas de mármol dispuesto en un esquema geométrico para reemplazar los frescos que fueron robados por las tropas de Napoleón durante el sitio de Vicenza.³⁶

Sobre la puerta de entrada a la cárcel de los vientos encontramos la inscripción en latín:

AEOLUS HIC CLAUSO

VENTORUM CARCERE

*REGNAT, EOLIA*³⁷

³⁶ MUSSOLIN, L., M. FELTRE, CLUB SPELEOLOGICO PROTEO-VICENZA. Il Covolo dei venti e il sistema dei ventidotti.

³⁷ Aquí en la cárcel de los vientos, Eolia, reside y reina Eolo.

A la entrada del criptopórtico había otra inscripción en latín, ya borrada que decía:

Franciscus Tridentus Vicentinus Jurisconsultus Hieronymi Equitis filius, gelidi venti flatum in Caverna Cubalo nuncupata spirantem in aedes proprias per hunc criptoporticum deduxit, ad temperandum arduentes et aestivos calores, quem tum cohibendo tum relaxando novo atque mirabili artificio per cubicola quaeque deducendo ea pro libito suo refrigerare, et calefacere valet, ita ut custodia villa, eius ingenio, diligentia, impensa, ac accumulatione, ornatior affecta, in Regia oblectamenta

Fig. 3.124. Fresco representando a Eolo en el Techo del Salón Principal.



*commemorari possit. Anno M.D.LXX aetatis suae
trigesimo secondo* ³⁸

Palladio en 1770 mencionaba la belleza de la villa Eolia, alabando su buena ejecución, y se refería a la cárcel de los vientos como una habitación enterrada construida por el excelentísimo Francesco Trento, a la que éste llamaba Eolia, y en la que desembocaban los ventidotti.

La cárcel de los vientos tiene una forma casi circular con techo abovedado desde la puerta situada a la derecha, que hoy día sigue utilizándose para regular el flujo de aire, se accede a los ventidotti. A la izquierda hay una pequeña ventana que comunica con el exterior, mientras que frente al acceso se puede apreciar la entrada a un conducto que en la actualidad está tapada.

En las puertas que conducen a la sala superior hay dos inscripciones

IN AESTU TEMPERIS

*INCOGNITA PRISCIS*³⁹

Ya en el interior de la sala encontramos el techo y las paredes decorados por frescos. La bóveda, apoyada sobre cuatro columnas corintias. En el centro de la bóveda encontramos una decoración octogonal con la figura de Eolo rodeado de nubes sosteniendo una llama encendida y doblada por el viento. En los cuatro laterales de la bóveda se encuentran representadas

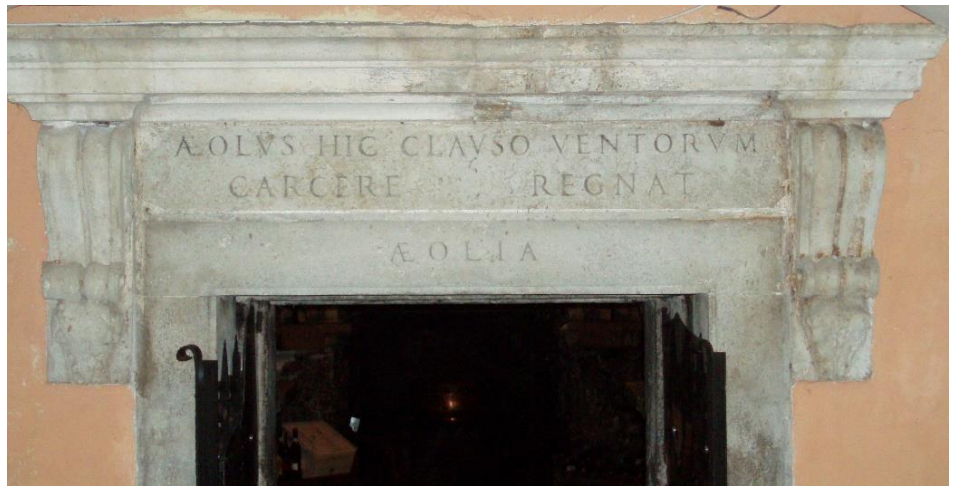
³⁸ El caballero Francesco di Trento hijo de Jerónimo, jurisprudente Vicentino, introdujo el fresquísimo soplo de los vientos de las cuevas en las estancias a través de un criptopórtico, atemperando los ardientes y estivos calores, y lo dirigió mediante un sistema admirable de conductos subterráneos que servían para refrigerar, y para calefactar, la villa. Su ingenio, diligencia, generosidad y buen gusto, sean regiamente conmemorados.

³⁹ En el período estival/ Lo desconocido por los antiguos.



Figs. 3.125. y 3.126 Grabados sobre la puerta del Salón principal y de la Cárcel de los vientos

Fig. 3.127. Cárcel de los vientos (sótano de Villa Eolía).



las cuatro estaciones. En la sala encontramos otras decoraciones pictóricas representando escenas de dioses.

Todos estos frescos fueron restaurados cuidadosamente ya que muchos de ellos sufrieron mucho deterioro durante la segunda guerra mundial, cuando esta villa fue ocupada por los alemanes.

El sistema de climatización de Villa eolia se mantiene en uso, particularmente en verano. Tanto la cárcel de los vientos como el último tramo de ventidotti que llega a ella se utilizan para la conservación de vinos. La única comunicación con el sistema de ventidotti que se mantiene es la orientada al norte, ya que la de la pared oeste fue tapiada.

Al igual que para las villas precedentes procederemos a la simulación CFD de la misma, con la salvedad de que, al ser esta villa la que se encuentra conectada al ventidotto A, que a su vez, como recordaremos, fue el que utilizamos para la toma de datos in situ y cotejar los resultados, en este caso no solo aportaremos los resultados de la simulación fluidodinámica sino que además realizaremos mediciones en el interior de la misma para contrastar los valores que obtengamos.

A continuación aportamos los gráficos obtenidos, los diagramas de Fanger extraídos de los mismos y los datos de las mediciones realizadas.

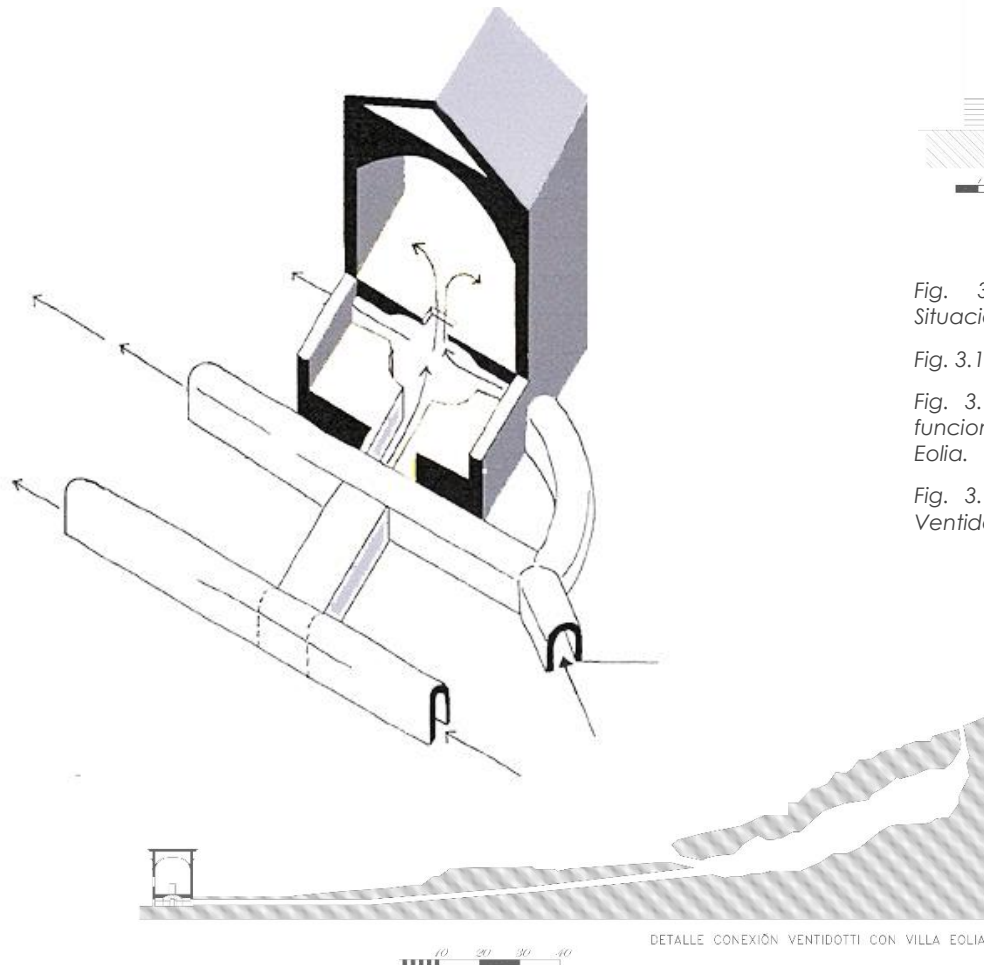
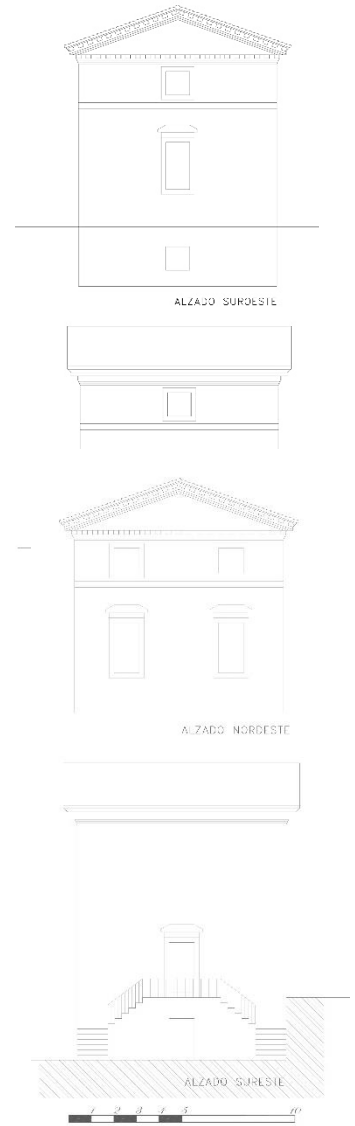
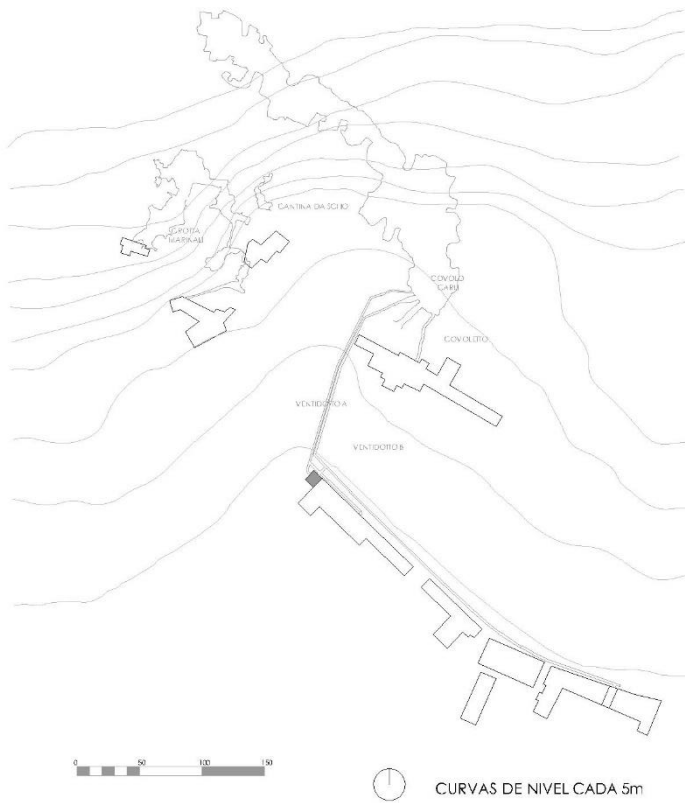
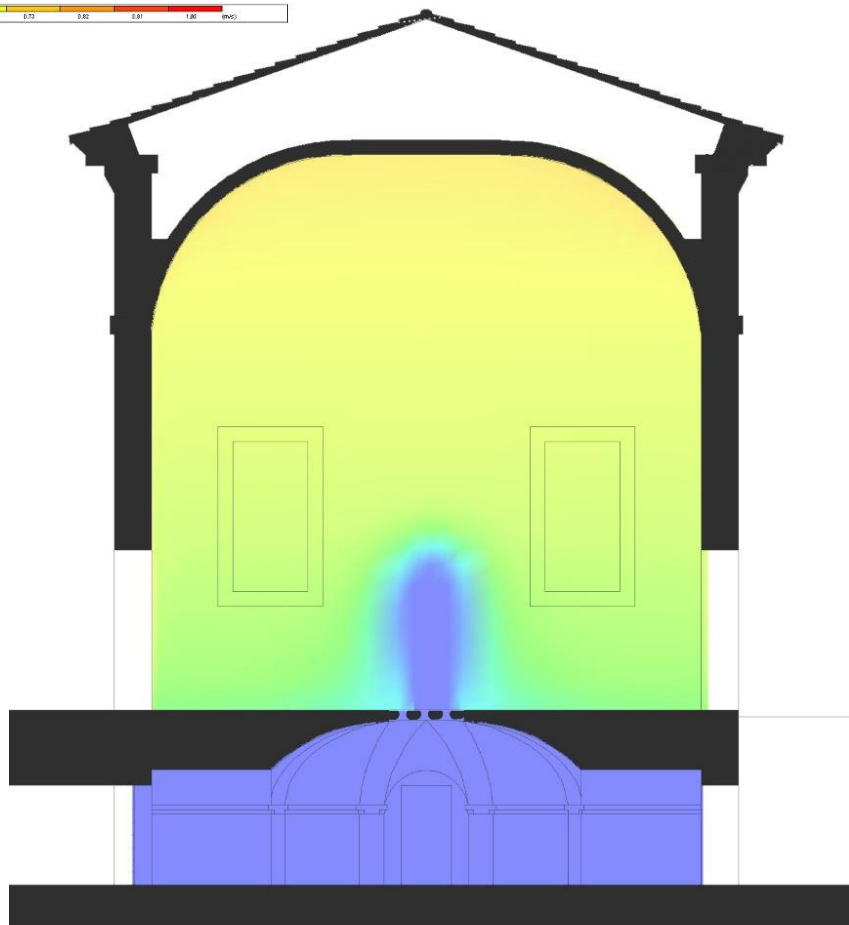
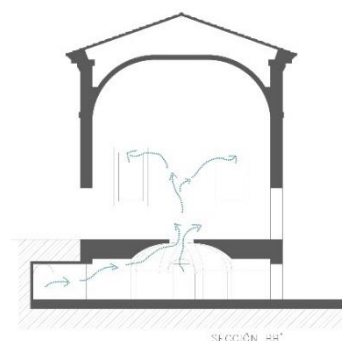
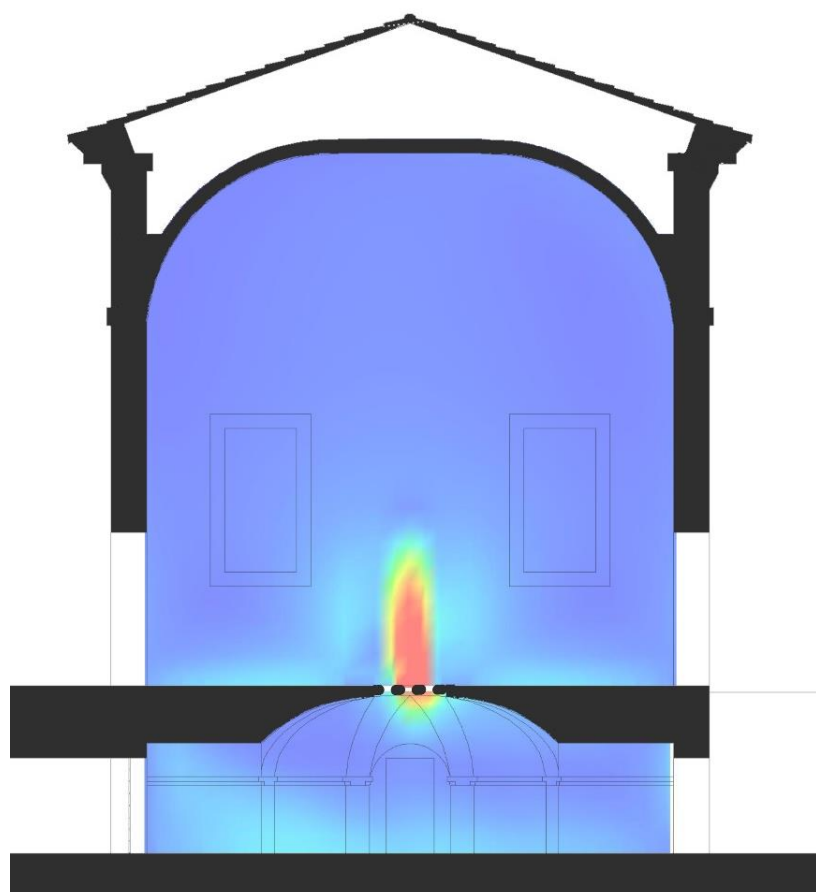


Fig. 3.128. Plano de Situación.

Fig. 3.129. Alzados.

Fig. 3.130. Esquema de funcionamiento de Villa Eolia.

Fig. 3.131. Sección con Ventidotto.



Resultados de la simulación CFD en la Villa Eolia. Gráficos de velocidad y Temperatura del aire con el sistema activado y desactivado.

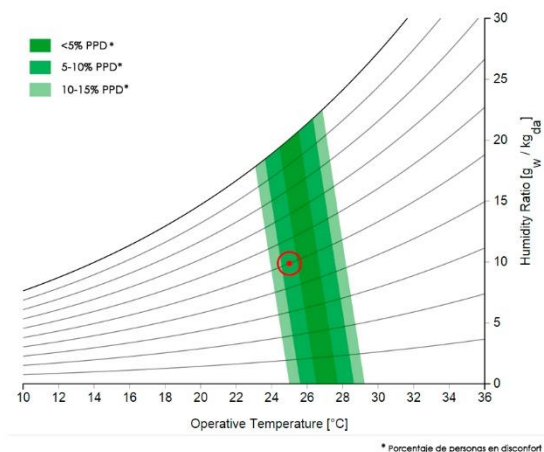
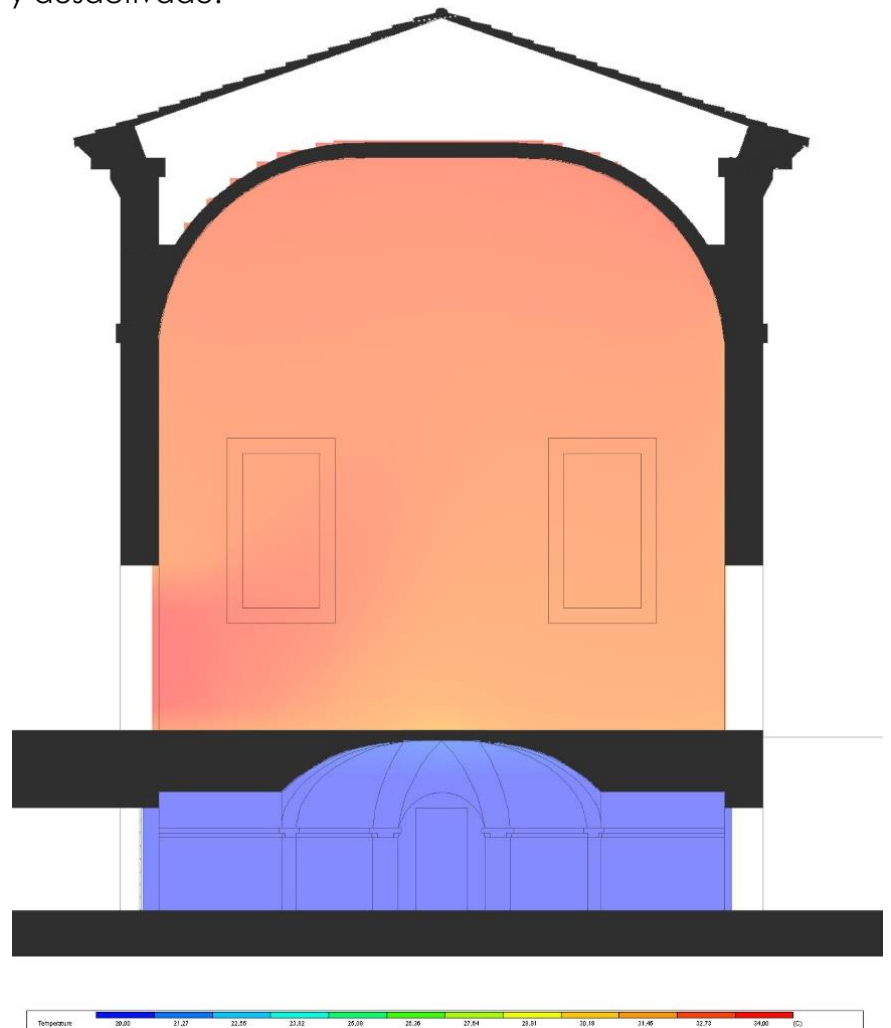
Fig. 3.132. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Eolia con el sistema de climatización natural activado. . Velocidad de aire.

Fig. 3.133. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Eolia con el sistema de climatización natural activado. . Temperaturas operativas.

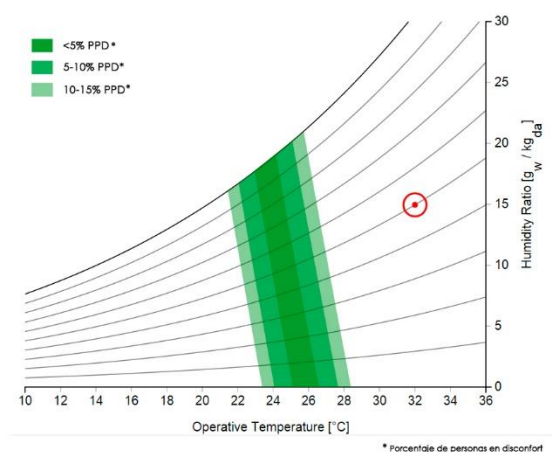
Fig. 3.134. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Eolia con el sistema de climatización natural anulado. . Temperaturas operativas.

Fig. 3.135. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa Eolia con climatización natural.

Fig. 3.136. Gráfica de Confort de Fanger para la sin climatización natural.



* Porcentaje de personas en disconfort



* Porcentaje de personas en disconfort

MEDICIONES

Al igual que para el Ventidotto A se realiza una toma de datos in situ el 18 de Agosto de 2012 desde las 6am hasta las 12pm.

Las mediciones se realizan a la salida de la roseta de ventilación situada en el salón y a la entrada del ventidotto A (Tabla 3.6).

VILLA EOLIA				
h	Text	T sotano	Tsalón	Tpuerta ventidotti
6	21	15,5	20,7	13,5
7	20,8	15,5	20,5	13,5
8	21	15,5	20,5	13,5
9	21,2	15,5	20,5	13,5
10	22	15,5	20,5	13,5
11	22,5	15,5	20,5	13,5
12	23,4	16,1	20,7	13,5
13	25	16,5	21	13,5
14	26,8	16,8	22	13,5
15	30,6	17,7	24,4	13,5
16	28	17,7	22,5	13,5
17	27,7	17,9	21,8	13,5
18	26	18,1	21,5	13,5
19	25,4	18,2	21,5	13,8
20	24	18,5	21,5	14
21	22	18,2	21,3	14
22	22	17,5	21	14
23	21,5	17,5	20,5	14
24	21,5	17,5	20,5	14

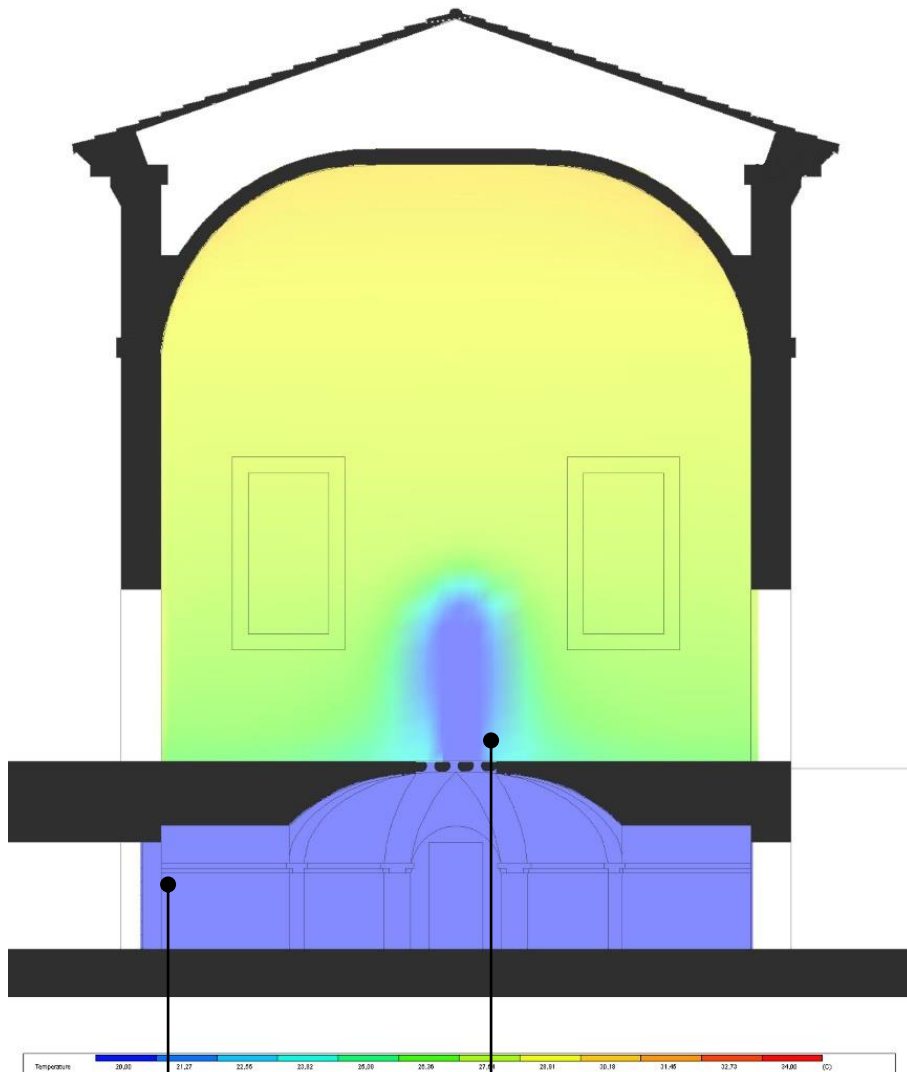
Elegimos los datos tomados a las 15 horas ya que las temperaturas exteriores coincidirían con las de la simulación.

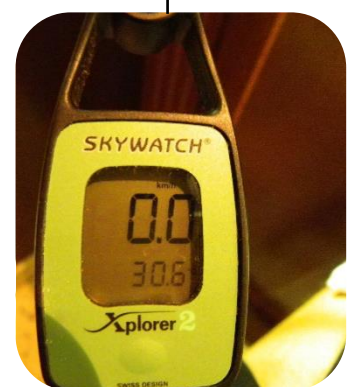
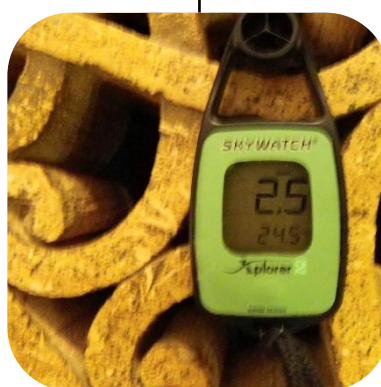
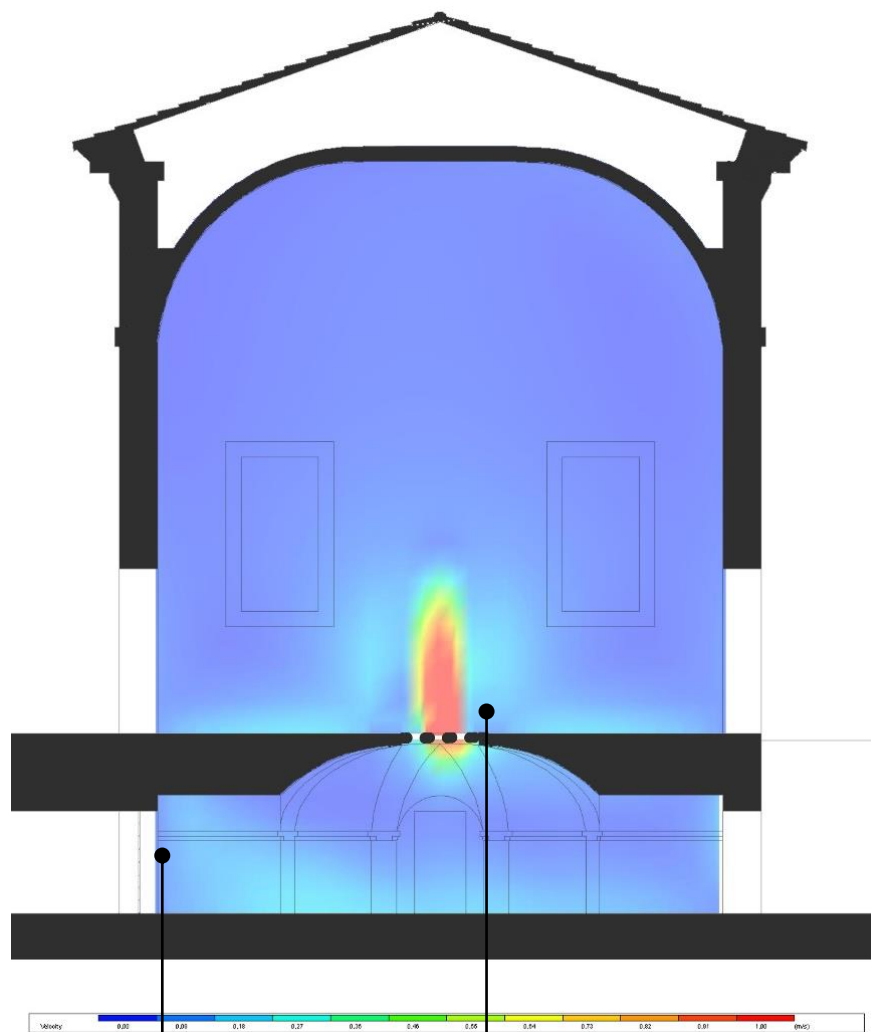
La comparativa nos muestra que los resultados de la modelización CFD resultarían bastante similares a los de la toma de datos para condiciones climáticas exteriores similares.

Tabla 3.6. Mediciones realizadas en Villa Eolia en Agosto de 2012

→En la página siguiente:
Fig. 3.142. Toma de datos en Villa Eolia y comparativa con resultados de modelización. Temperaturas.

Fig. 3.143. Toma de datos en Villa Eolia y comparativa con resultados de modelización. Velocidad del aire.





3.3.3 VILLAS CONECTADAS A COVOLI



VILLA DA SCHIO

El conjunto de las villas da Schio está formado por Villa de Schio, Ca' Molina y el villino Garzadori. Se trata de un conjunto de edificios de diferentes orígenes y diferentes constructores y, salvo el Villino Garzadori, todas ellas pertenecían a la familia de Trento hasta que pasaron, por una herencia, a pertenecer al Conde da Schio alrededor de 1830.

Al parque que rodea a las tres villas se accede por una reja que se encuentra enfrente de la villa Eolia. Este es considerado uno de los más bonitos de la zona de Vicenza y su construcción data del siglo XVI por la familia Trento.

En este caso el flujo de aire no se hace a través de conductos artificiales o ventidotti sino por conexión directa a las grutas a través de conductos naturales muy estrechos y estos a su vez con el Covolo dei Venti. Las orientaciones de los edificios dejan intuir estas conexiones directas con las grutas.

Figs. 3.144, 3.145, 3.146. y 3.147., Vistas del Exterior de Villa da Schio.



La villa principal, Villa da Schio está situada casi en mitad de la ladera en la que se desarrolla el parque. Resulta interesante de esta construcción la irregularidad de la composición de sus fachadas, más rígida en la parte correspondiente al siglo XVII y que está orientada al sur, y, como sugiere también Cevese resulta más atractiva al espectador por sus loggias jónicas una frente a otra. Originariamente estas loggias estaban abiertas pero hoy día se encuentran acristaladas. La arquitectura resulta poco usual por su construcción adaptándose a la ladera de la montaña y adosada completamente a la roca. Las plantas, tres desde la orientación sur, se reducen según sube la ladera de la montaña hacia el este, a dos plantas y después a una sola, con diferentes entradas a las cuales se acceden por unos graderíos.

En lo que se refiere a los espacios interiores hay que señalar que hay una sala con frescos con representaciones de perspectivas arquitectónicas y alguna representación paisajística. Los techos son artesonados en madera con distintas decoraciones.

En la propia villa da Schio se deja intuir esta conexión directa a la cueva por la peculiar implantación de la edificación y se pone de manifiesto en las fuertes corrientes de aire que llegan a la sala de fiestas. El sótano de la villa está directamente conectado a una gran abertura en la roca en la que a su vez terminan pequeñas fisuras que conectan con la Grotta Marinali, situada bajo el Villino Garzadori, desde la cual llega el aire. Todas estas fisuras se encuentran interconectadas a su vez entre sí generando fuertes corrientes subterráneas de aire.

El Conde da Schio, actual propietario de la villa, ha incorporado a la roseta que conecta con el salón una resistencia eléctrica alcanzando también así una temperatura adecuada para el invierno.

Fig. 3.148. Roseta de ventilación en Villa da Schio.

Fig. 3.149. Vista del interior del Salón de Celebraciones de Villa Schio con la roseta de ventilación en el centro.

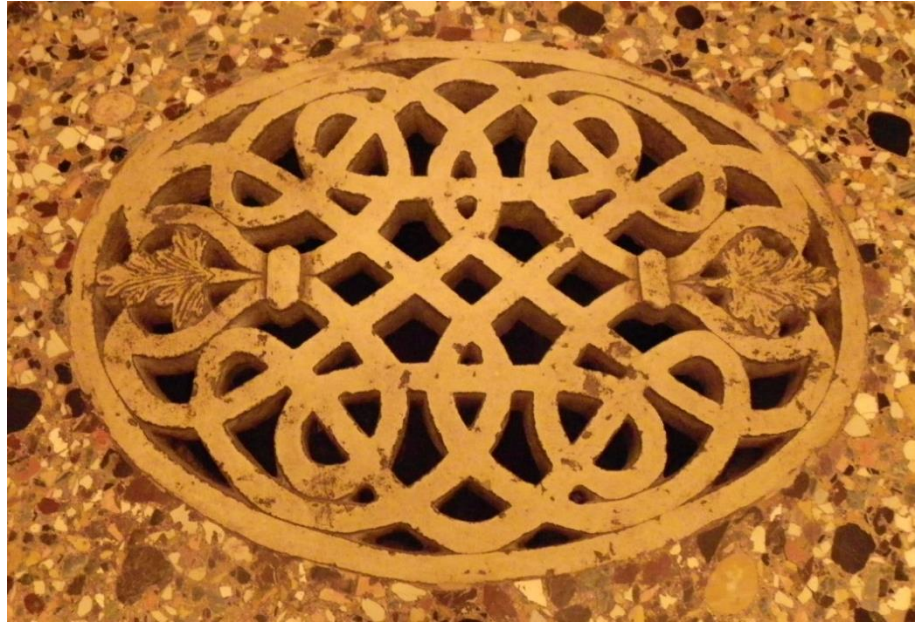


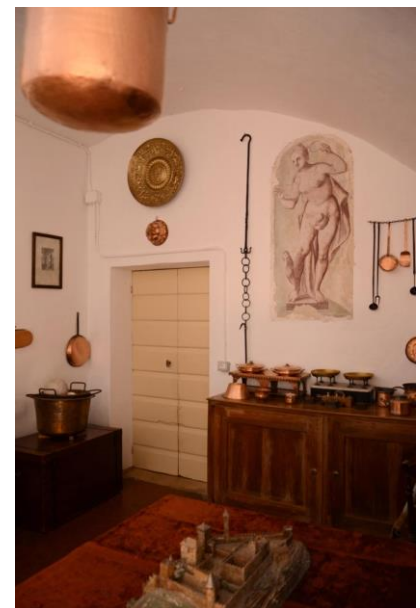


Fig. 3.150. Pintura Mural Representando al Dios Eolo que se encuentra en una de las paredes de la bodega conectada con el Covolo da Schio.

Figs. 3.151. y 3.152., Otras pinturas murales encontradas en la planta baja de la Villa

A continuación procederemos, al igual que en las villas conectadas a Ventidotti a realizar una simulación fluidodinámica del sistema operativo y anulado con el fin de el sistema de refrigeración natural. En este caso las condiciones de contorno del aire de impulsión serían las del Covoletto da Schio⁴⁰.

Al igual que en casos anteriores el análisis de resultados se realizará al final.

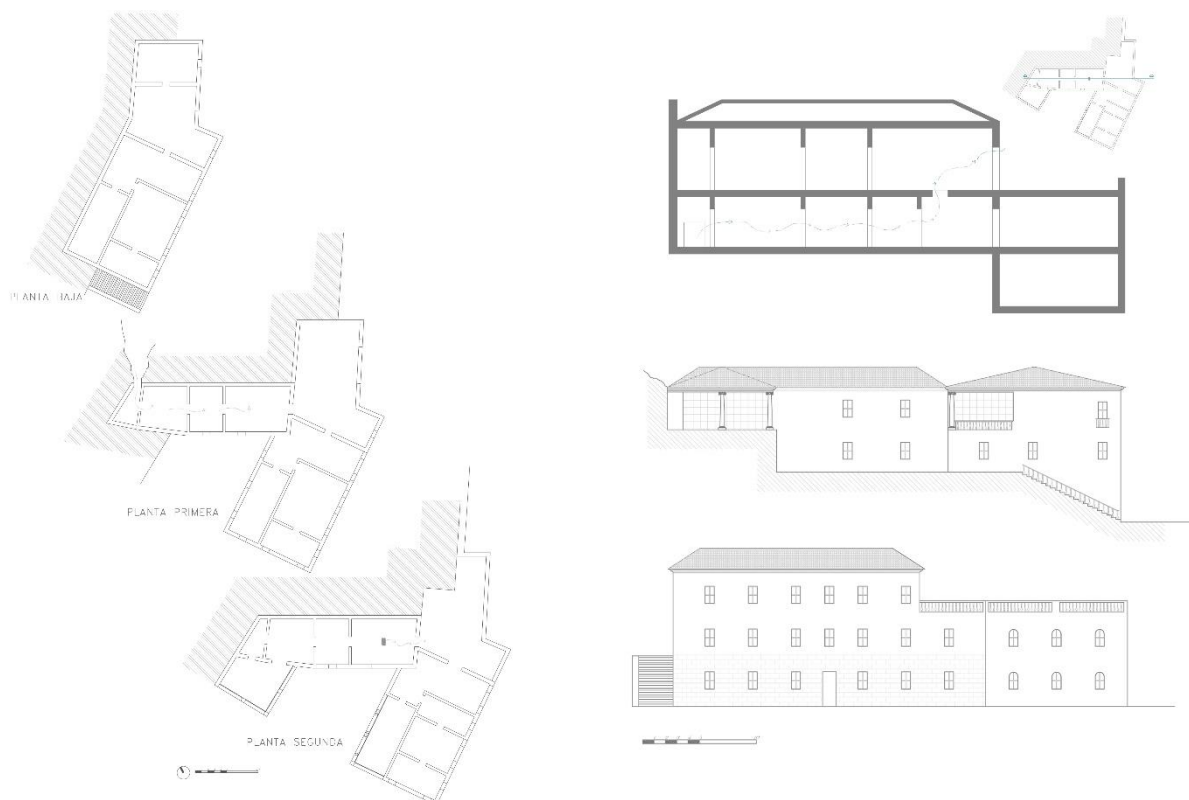


⁴⁰ Vease Tabla 3.3 en pag 79



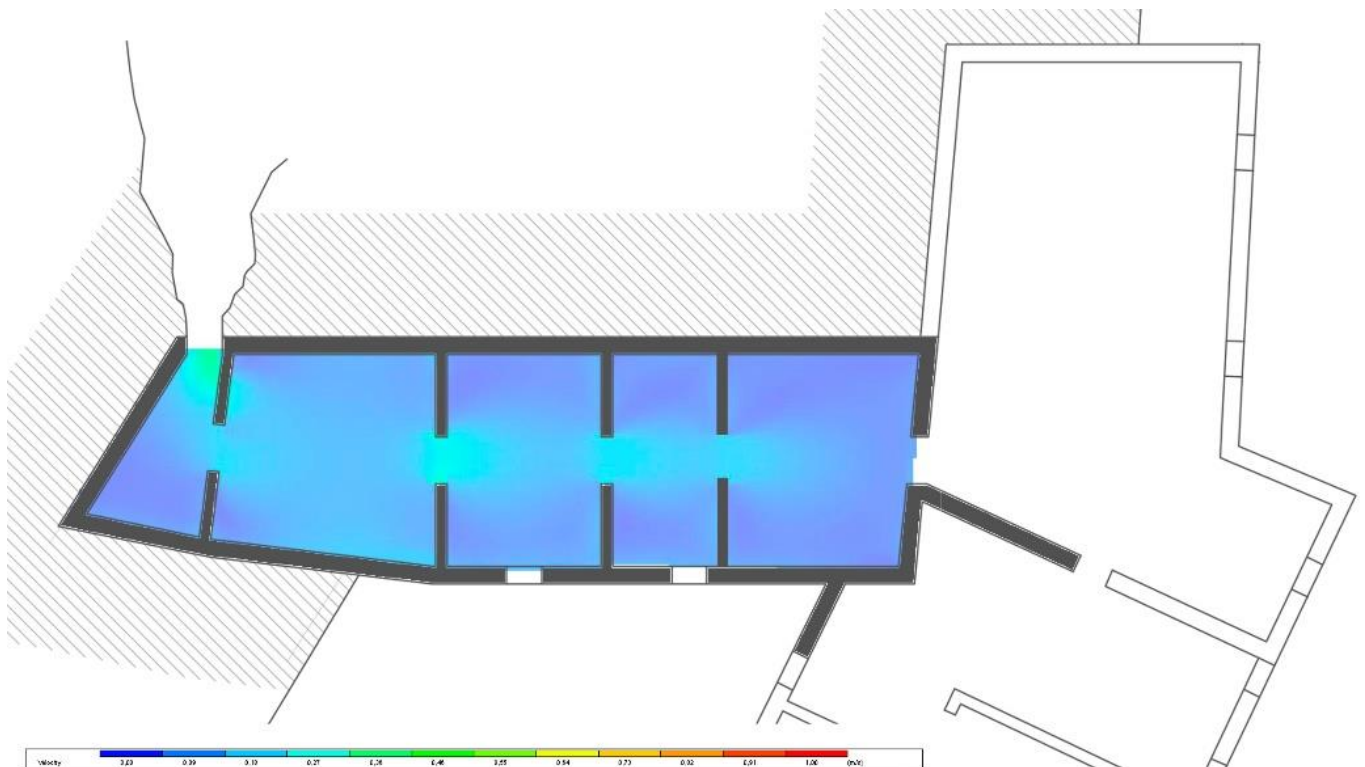
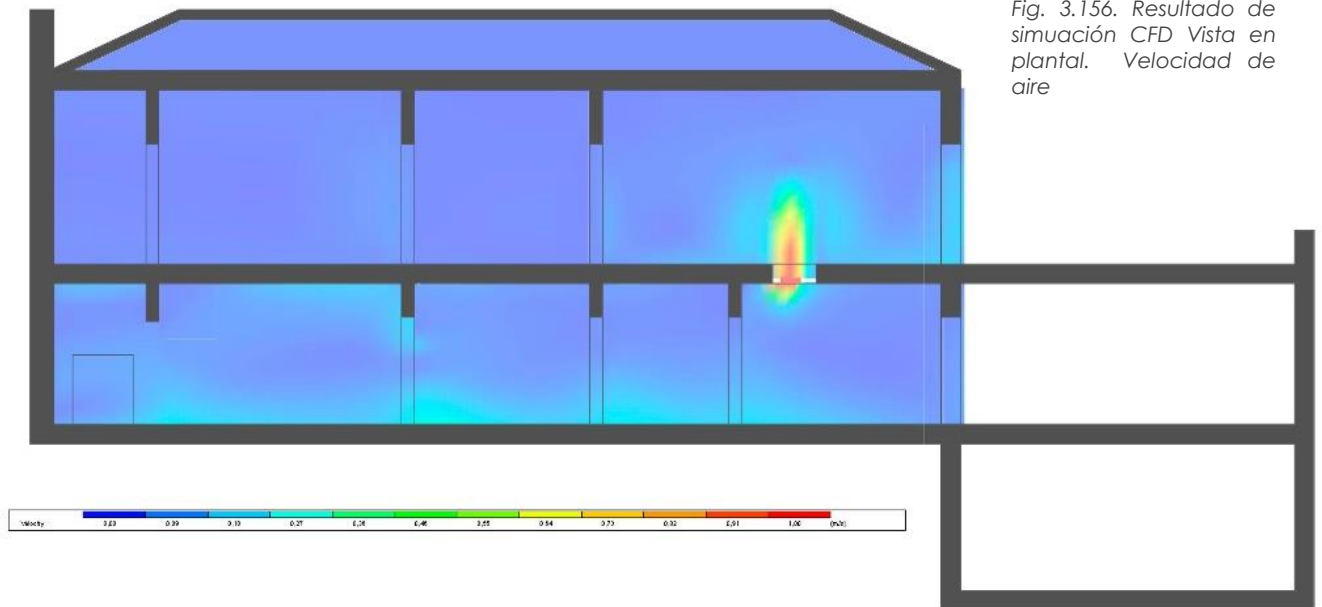
Fig. 3.153. Plano de situación.

Fig. 3.154. Planimetría de la Villa.



Resultados de simulación CFD gráficos de velocidad del aire.

Fig. 3.155. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Da Schio con el sistema de climatización natural activado. Sección Longitudinal. Velocidad de aire.



Resultados de simulación CFD gráficos de temperatura con el sistema de climatización activado y desactivado.

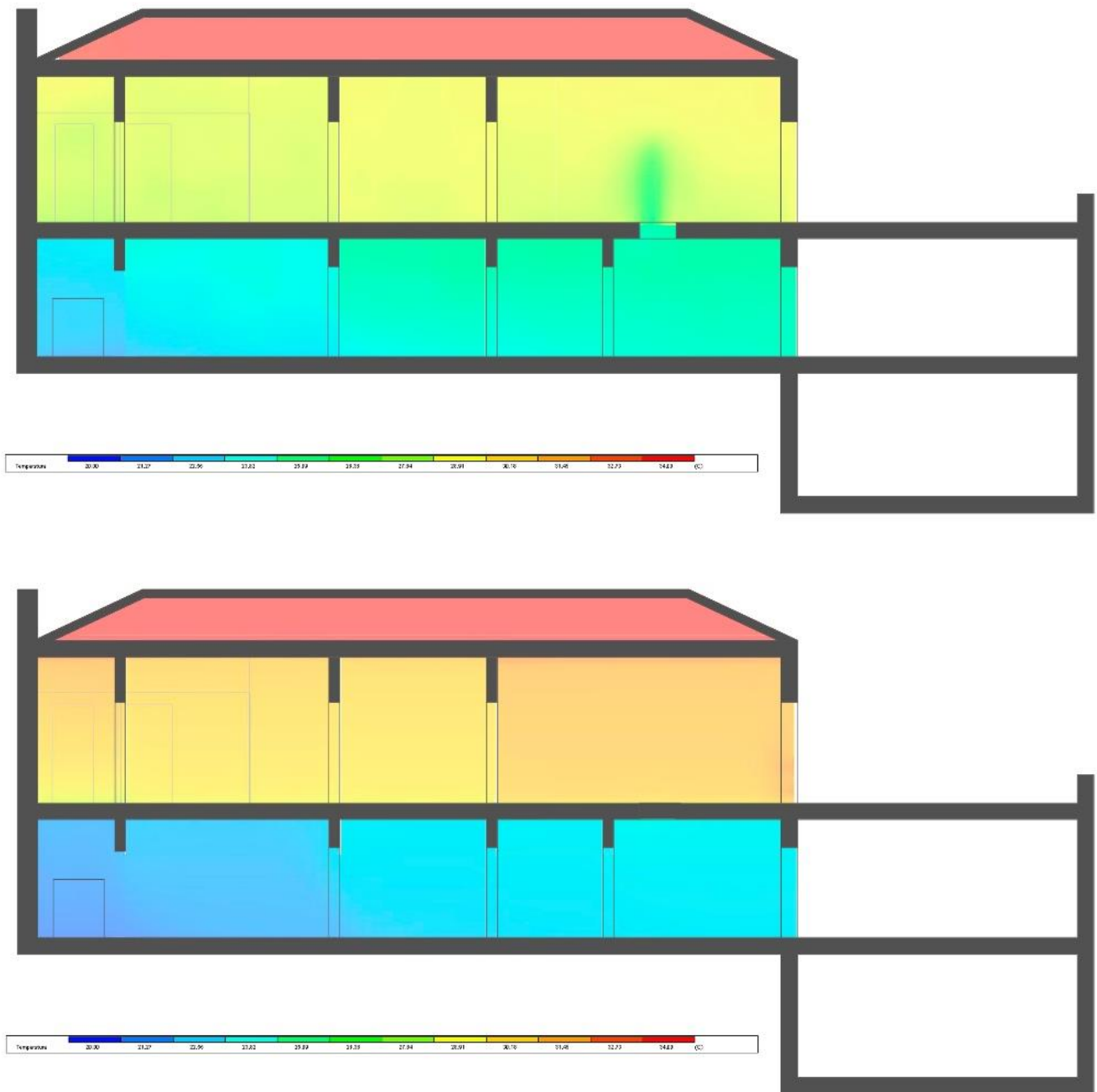


Fig. 3.157. Resultado de simulación CFD con el sistema de climatización natural activado. Sección Longitudinal. Temperaturas operativas.

Fig. 3.158. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Da Schio con el sistema de climatización natural anulado. Sección Longitudinal,. Temperaturas operativas.

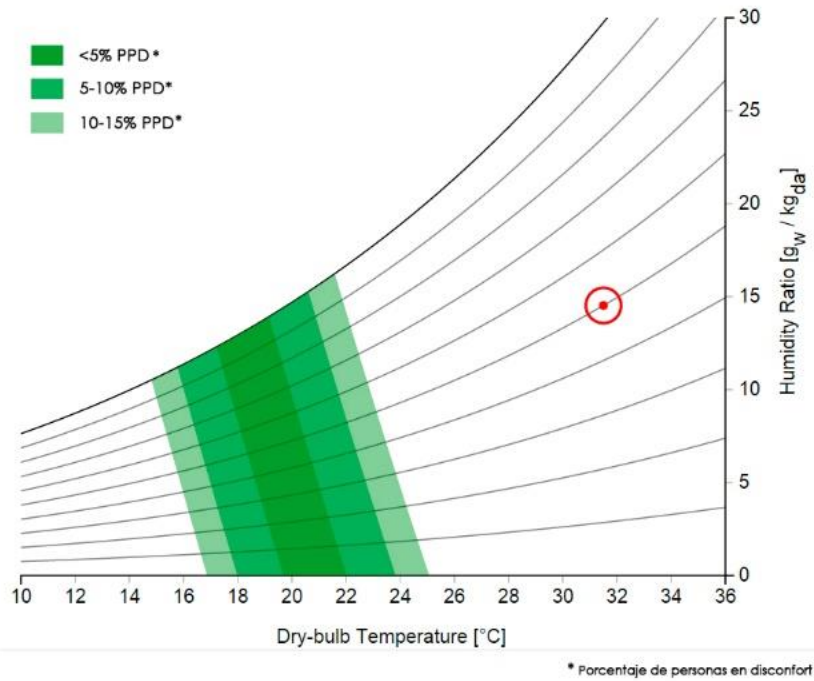


Fig. 3.159. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa da Schio en el Salón de Celebraciones. sin climatización natural.

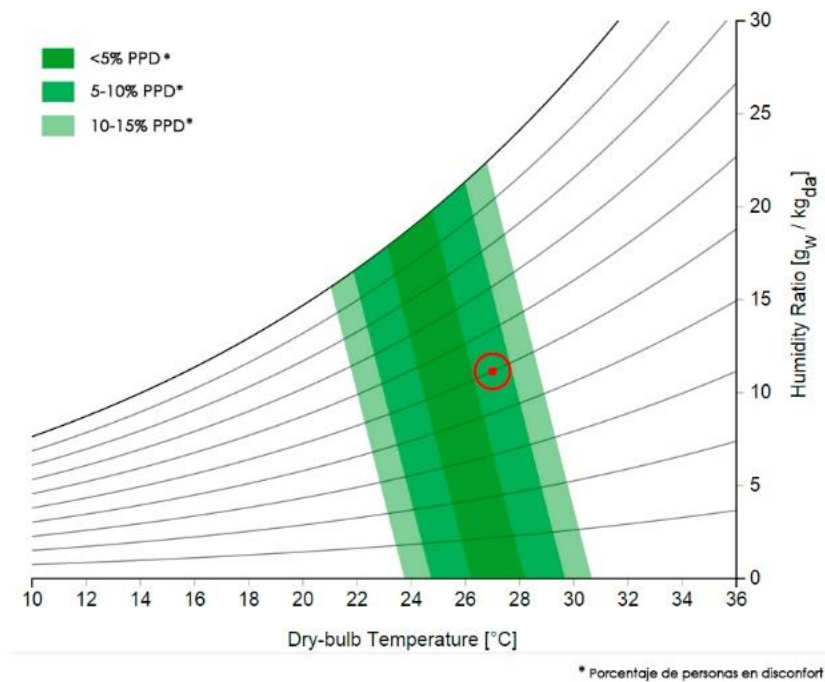


Fig. 3.160. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa da Schio en el Salón de Celebraciones con climatización natural.

Gráficas de confort de Fanger con el sistema desactivado y activado.

CA MOLINA

Situada al mismo nivel y cercana a Villa schio, toma su nombre de uno de sus propietarios Francesco Molin, y fue adquirida por la familia Trento entre otras propiedades de la familia Molin entre 1673 y 1671.⁴¹

En la descripción que hace Cevese⁴² la fachada delantera menciona un frontón triangular que se imponía por sus dimensiones y su aspecto severo con una composición arquitectónica de líneas rectas y ritmo marcado. La composición arquitectónica global de la villa de estilo neoclásico data de finales del XVIII, aunque conserva algunos elementos del siglo XVI y su primitiva estructura, ejemplo de esto son la puerta de acceso y la del pasillo.

Para el caso de 'Ca Molina el elemento en contacto con el terreno sería la bodega que se encuentra excavada en la roca, la llamada Cantina da Schio. Al tener el espacio aclimatado de este modo un uso exclusivo de almacén no resulta de particular interés para nuestro análisis.



⁴¹ CATALOGO ISTITUTO REGIONALE VILLE VENETE. Villa 'Ca Molina.

⁴² CEVESE R. (1980) Ville della provincia di Vicenza, Rusconi ed., Milano.

Figs. 3.161., y 3.162 Vistas exteriores de la Villa.

Fig. 3.163. Cantina da Schio.



VILLINO GARZADORI

Una inscripción grabada sobre la puerta indica el año 1690 como la fecha posible de construcción de la villa, cuya autoría se atribuye a Alfonso Garzadori.

Esta pequeña villa tiene una implantación irregular debida a la morfología del terreno se divide en dos plantas y está semiexcavada en la roca, por este motivo también se la conoce como la Grotta o Grotta Marinalli, ya que este escultor vivió en ella en sus últimos años de vida, utilizando para su obra una cantera que se encontraba bajo la villa.

La sala más conocida de la villa es la denominada la Grotta donde se combinan la roca natural con la arquitectura y los frescos, generando un espacio bastante teatral. En esta sala encontramos unas aberturas directamente conectadas con la gruta que se encuentra justo debajo y desde las cuales llega el aire atemperado.

Fig. 3.164. Vista del exterior del Villino Garzador.

Fig. 3.165. Vista del interior del Villino Garzador.

El sistema del Villino ha sufrido muy pocas modificaciones a lo largo del tiempo. Esta edificación se sitúa directamente sobre una cueva, la Grotta Marinali, y toda la pared norte se encuentra directamente excavada en la roca, quedando esta configuración perfectamente integrada en la arquitectura así como en las decoraciones del techo. En la pared norte de la sala principal encontramos a unos 30 cm del suelo unas aberturas ovaladas protegidas por pequeñas rejas que



comunican directamente con la parte más elevada de la cueva.

Aunque el análisis realizado es durante el período estival, cabe destacar que se trataría del edificio de los estudiados que mejor comportamiento invernal presenta gracias a su aprovechamiento directo de la inercia térmica del terreno, la orientación sur y el aire atemperado que entraría a través de las aberturas.

Para la simulación CFD tomaremos en esta ocasión los datos de la Grotta Marinali⁴³.

Fig. 3.166. Vista del interior del Villino. Destaca el interior excavado en la roca decorada también por frescos representando a dioses del viento. La pared del fondo se encuentra decorada por unos nichos que albergan estatuas de Diana, Mercurio y Apolo realizadas por el escultor Orazio Marinali.



⁴³ Vease Tabla 3.4 en pág. 80



Fig. 3.167. Detalle de los nichos con estatuas de Diana y Apolo.

Fig. 3.168. Detalle de una de las tres rejillas de ingreso de aire desde la Grotta Marinali con frescos representando deidades del viento.



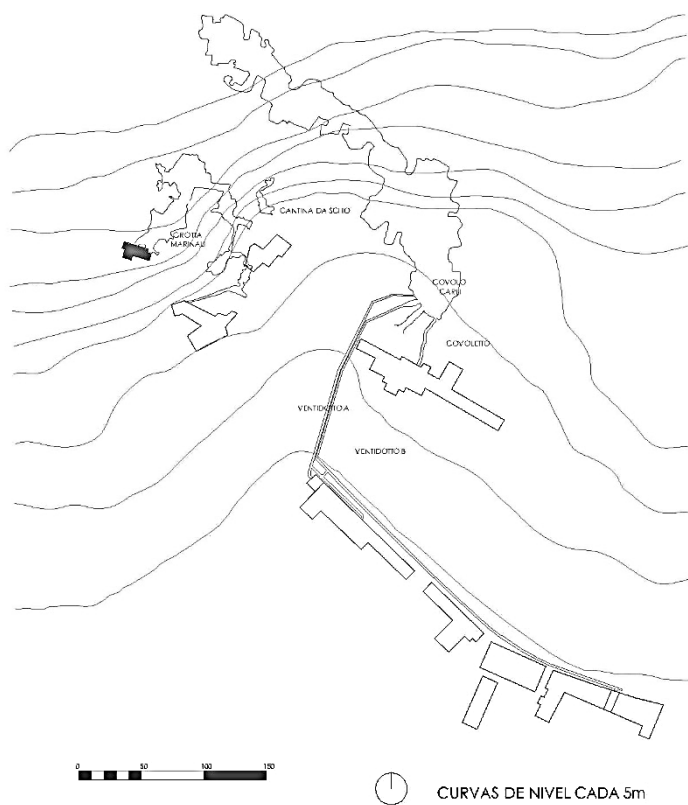
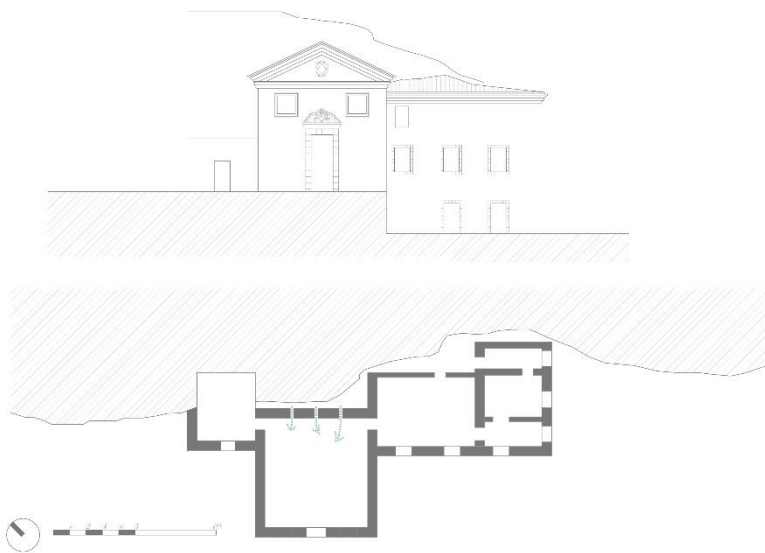
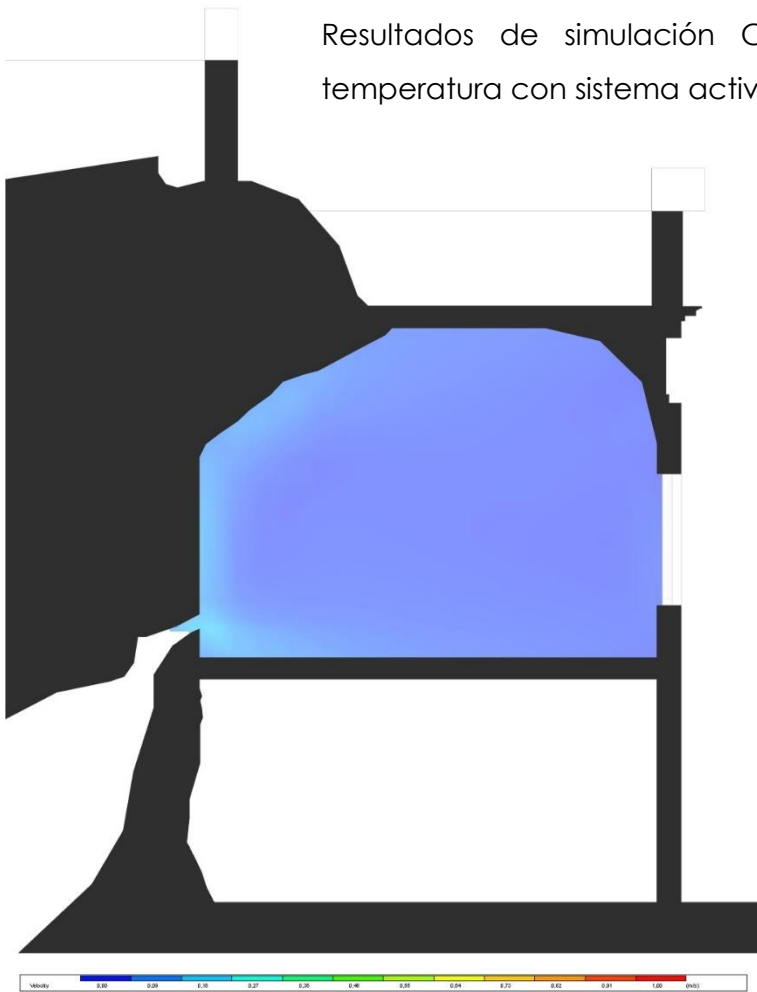


Fig. 3.169. Plano de Situación.

Figs. 3.170. y 3.171., Alzado y Planta baja.



Resultados de simulación CFD gráficos de velocidad del aire y temperatura con sistema activado.

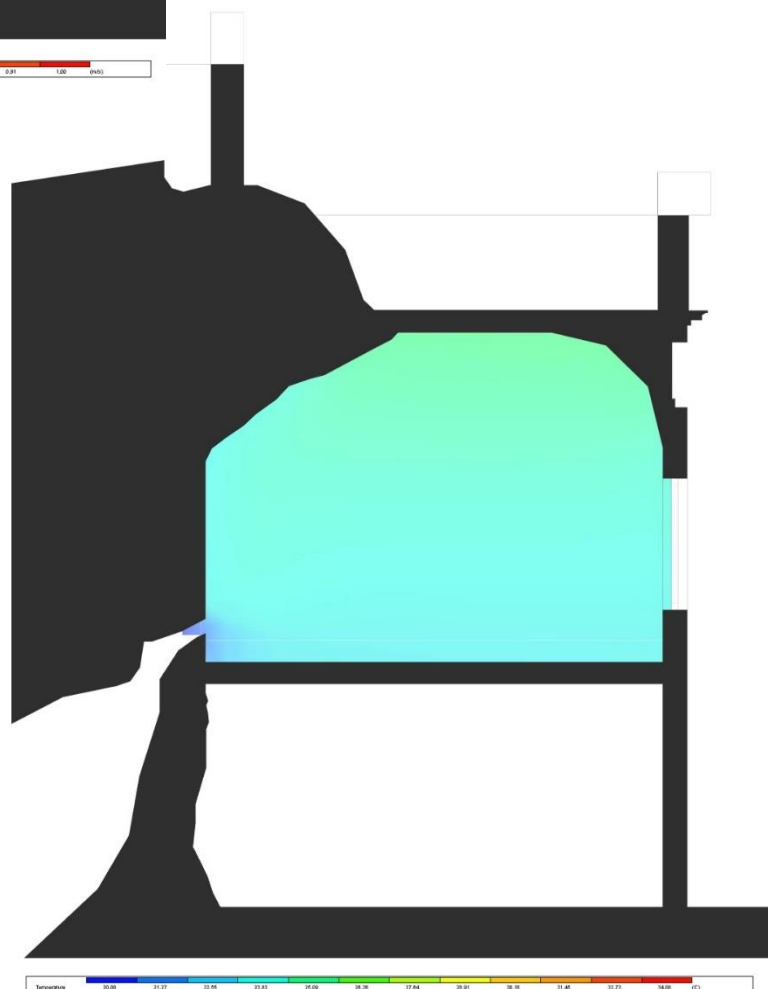


←

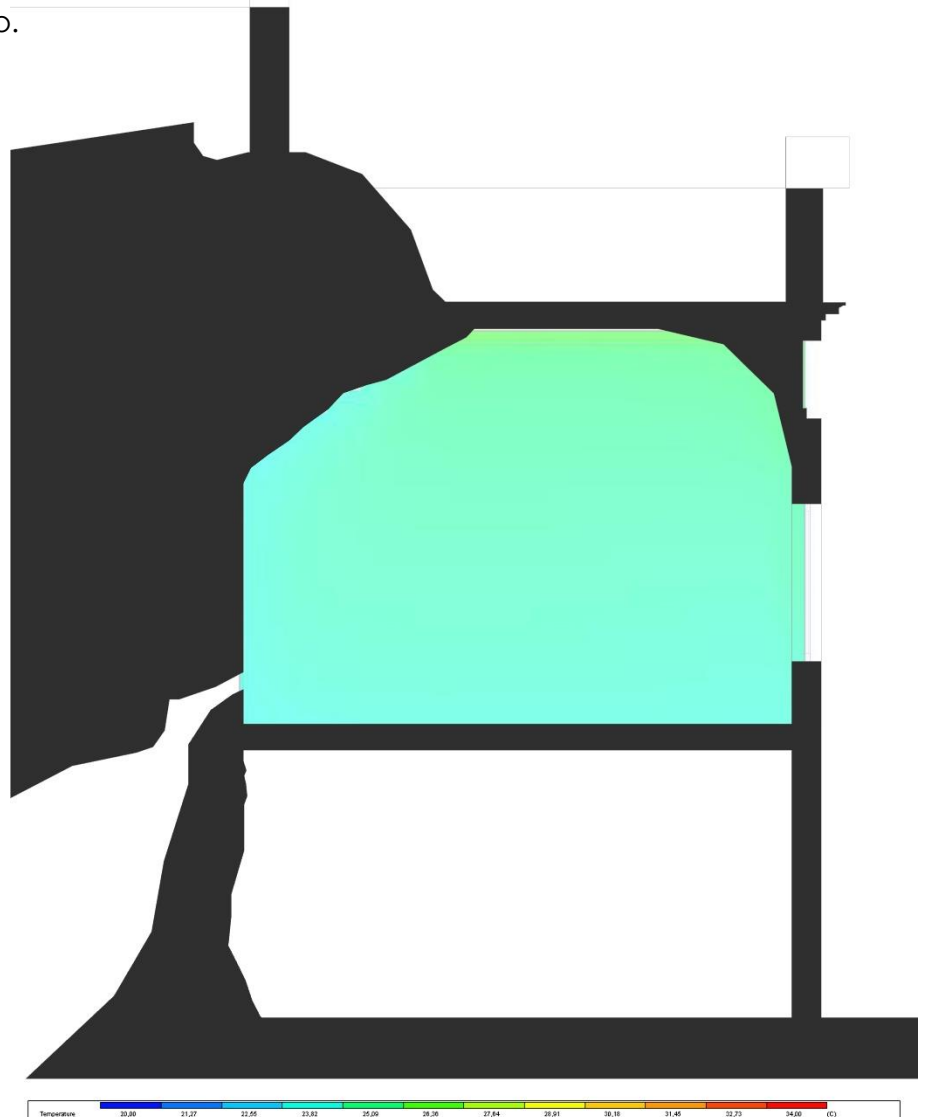
Fig. 3.172. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villino Garzadori con el sistema de climatización natural activado. Sección A.. Velocidad de aire.

↓

Fig. 3.173. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villino Garzadori con el sistema de climatización natural activado. Sección A.. Temperaturas operativas.



Resultados de simulación CFD gráficos de temperatura con sistema desactivado.



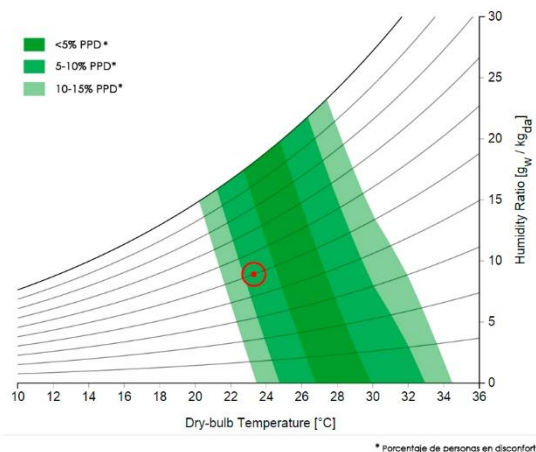
→

Fig. 3.174. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villino Garzadori con el sistema de climatización natural anulado. Sección A. Temperaturas operativas.

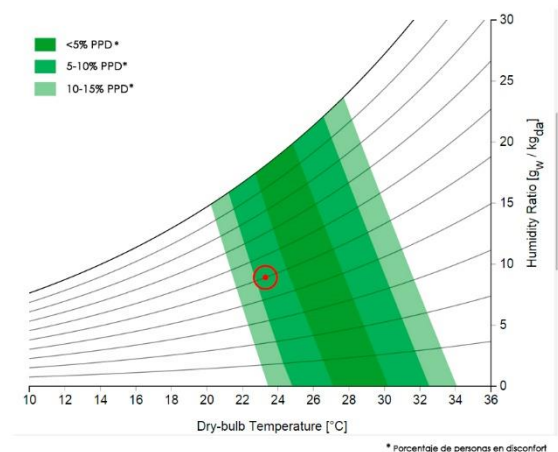
↘

Fig. 3.175. Gráfica de Confort de Fanger para la Villino Garzadori sin climatización natural.

Fig. 3.176. Gráfica de Confort de Fanger para la Villino Garzadori con climatización natural.



* Porcentaje de personas en disconfort



* Porcentaje de personas en disconfort

3.3.4 VILLAS CON SÓTANO COMO INTERCAMBIADOR

↓↗

Figs. 3.177. y 3.178. Vistas exteriores de Villa Capra.





VILLA CAPRA "LA ROTONDA"

Se sitúa en un promontorio en los montes Bérlicos, al sudeste de Vicenza.

El propio Palladio hace referencia a la estrecha relación de este edificio con el paisaje en sus "Quattro libri dell'Architettura":

El lugar es uno de los más bellos, amenos y apacibles que pueden encontrarse, ya que está en la cima de un promontorio al que se llega sin gran esfuerzo. A su alrededor se ordenan otras lomas, que forman una especie de inmenso teatro...; y como la perspectiva es bella por doquier, se han puesto logias a todas las fachadas.⁴⁴

La construcción, iniciada en 1566, consiste de un edificio cuadrado, completamente simétrico e inscripto en un círculo perfecto (ver planta). Sin embargo, describir la villa como "Rotonda" (redonda) es técnicamente incorrecto, ya que la planta del edificio no es circular, sino que puede ser definida como la superposición de un cuadrado y una cruz. Cada una de las cuatro fachadas presenta un volumen avanzado con

⁴⁴ PALLADIO, A. 1508-1580 Andrea Palladio : los cuatro libros de la arquitectura. Traducción al español por Arq. Carlos Pérez Infante; De la versión en inglés de Issac Ware (1738). México : Universidad Autónoma Metropolitana : Limusa, 2005



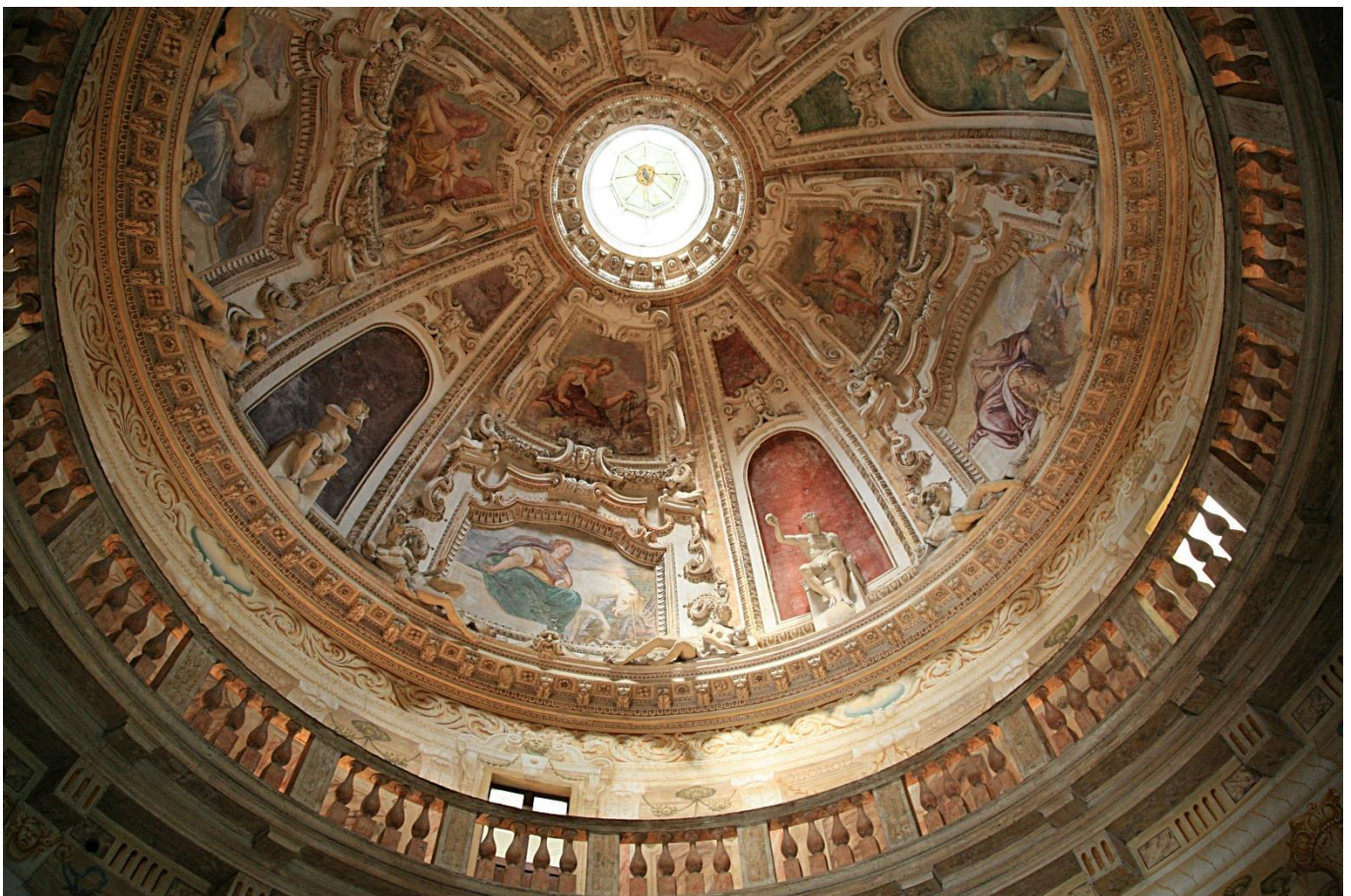
Fig. 3.179. Interior del Salón Principal de la Villa

Fig. 3.180. Vista de la Cúpula con la linterna en la parte superior.

una galería (loggia) a la que se accede mediante amplias escalinatas externas.

Tras la muerte de Palladio en 1580, es, Vincenzo Scamozzi quien, contratado por Almerico, se encarga de supervisar las tareas de finalización de la obra inconclusa, efectuadas en 1585, limitadas al cuerpo principal, con la construcción de la cúpula, rematada con la linterna.

Palladio pensaba cubrir la sala central con una cúpula semiesférica, pero Scamozzi proyectó una cúpula más baja, con un óculo (que debía ser a cielo abierto) inspirándose en el Panteón romano. Otra de las aportaciones de Scamozzi fue la elevación de la escalinata orientada al Sureste, elevación que permite un mayor aprovechamiento de los vientos predominantes que venían de aquella dirección. La escalinata fue modificada en el siglo XVIII por Ottavio Bertotti Scamozzi, que



le devolvió la forma original proyectada por Palladio y el ático fue subdividido en locales por Francesco Muttoni, quien modificó los entresijos en el siglo XVII.

En la Rotonda, la refrigeración del aire mediante se realiza a través del sótano por lo que sería necesario calcular el intercambio térmico de este con el suelo en primer lugar.

Este intercambio lo vamos a calcular mediante el software Design Builder y el motor de cálculo de Energy Plus. Las gráficas obtenidas se muestran en las Figs. Fig. 3.185, Fig. 3.186 y Fig. 3.187. En éstas se puede observar el diferencial térmico entre el sótano y la cúpula que generará el movimiento de aire.

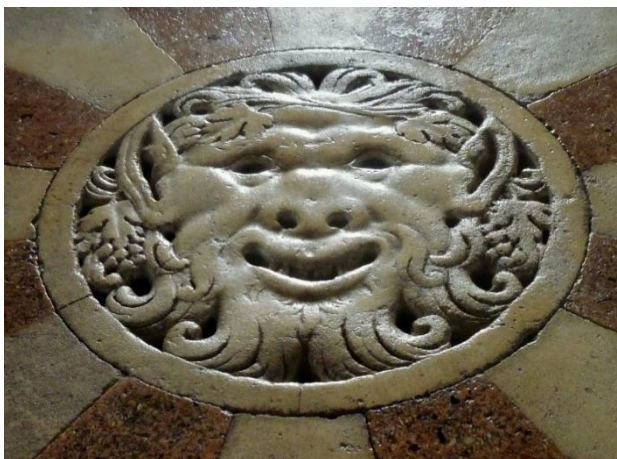
Con los datos obtenidos como condiciones de contorno procederemos entonces a la simulación CFD cuyos gráficos se muestran en las Figuras Fig. 3.190, Fig. 3.191 y Fig. 3.192.

En la Fig. 3.190 se puede apreciar la influencia del efecto Stack en la velocidad del aire dentro de la Villa.

Resulta interesante superponer la planta de la Villa a la rosa de los vientos (Fig. 3.188) y compararlo con las velocidades obtenidas mediante CFD (Fig. 3.189) y poder comprobar la pertinencia del diseño para el aprovechamiento de las corrientes predominantes.

Fig. 3.181. Rejilla de ventilación en el centro de la Villa representando imagen de fauno.

Fig. 3.182. Interior del Criptoportico.



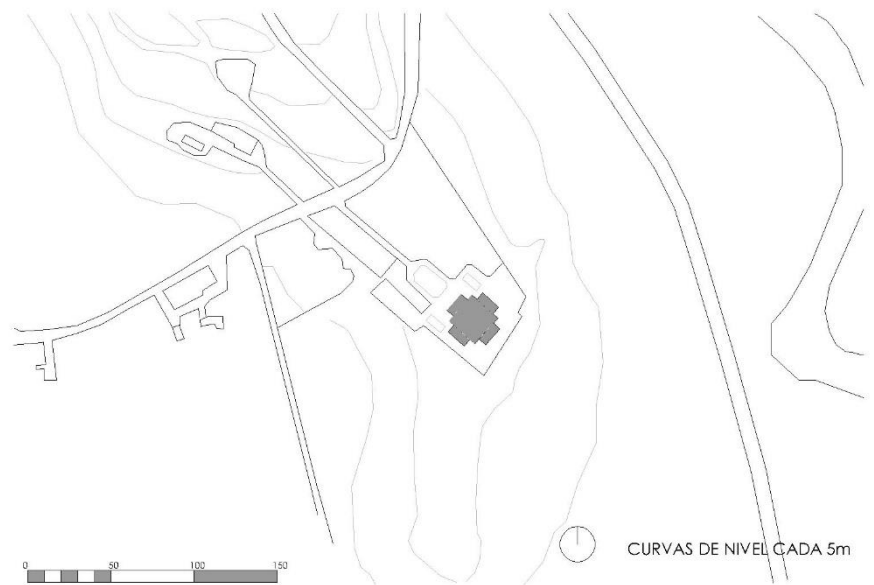
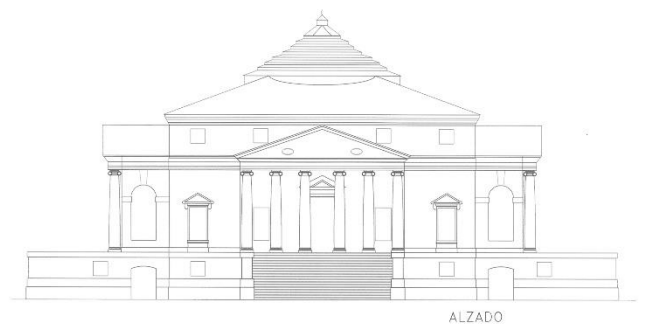
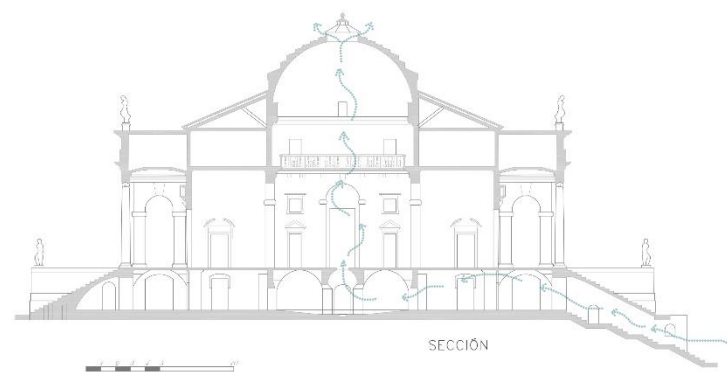
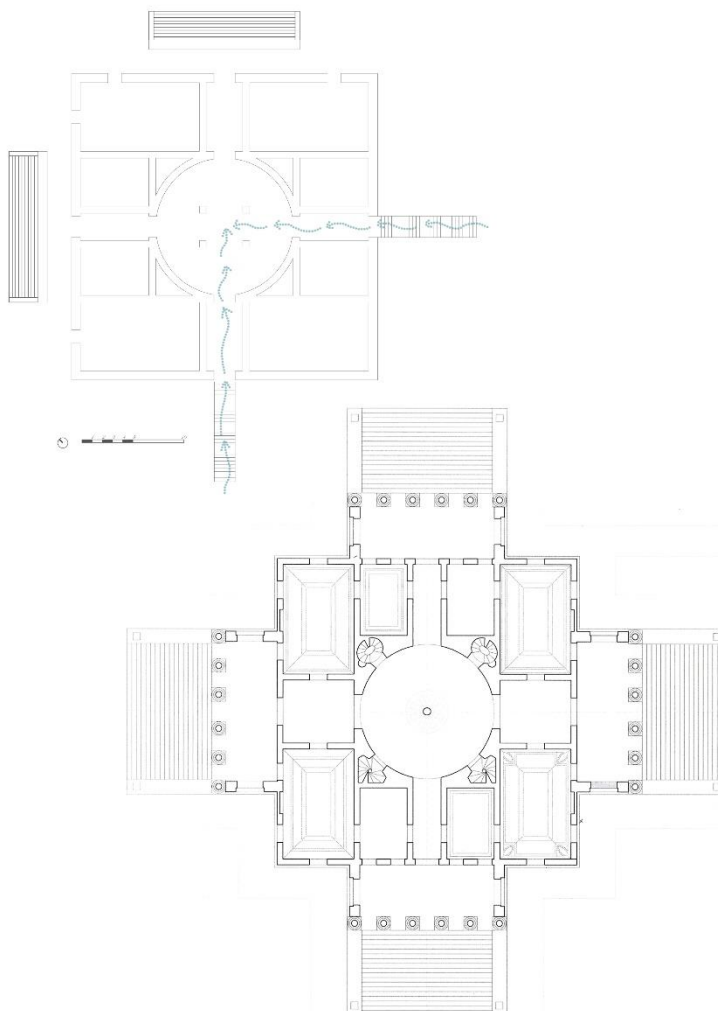
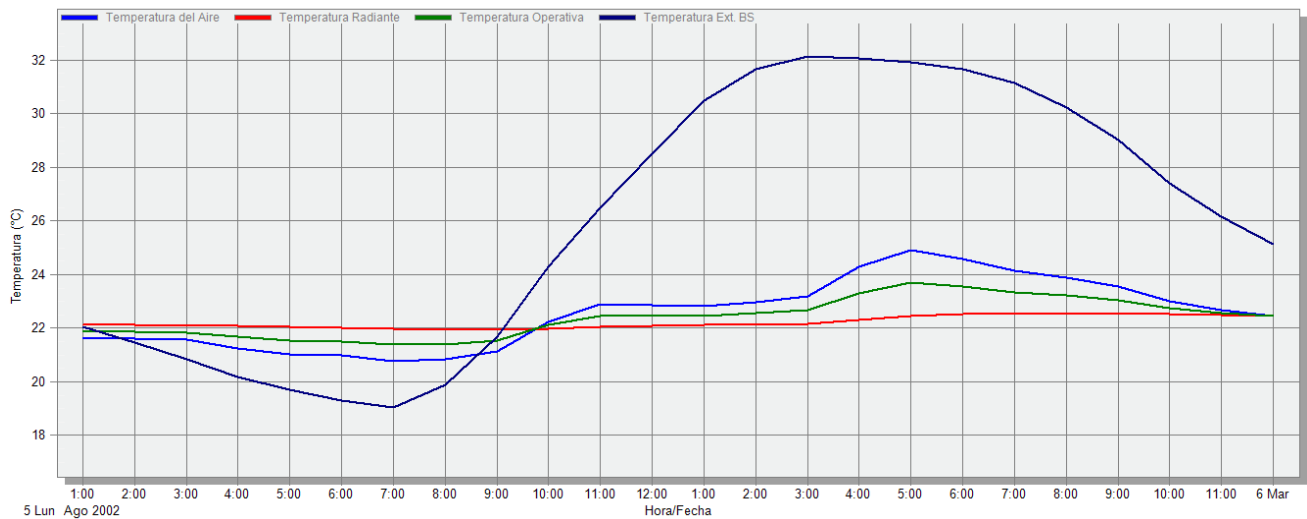
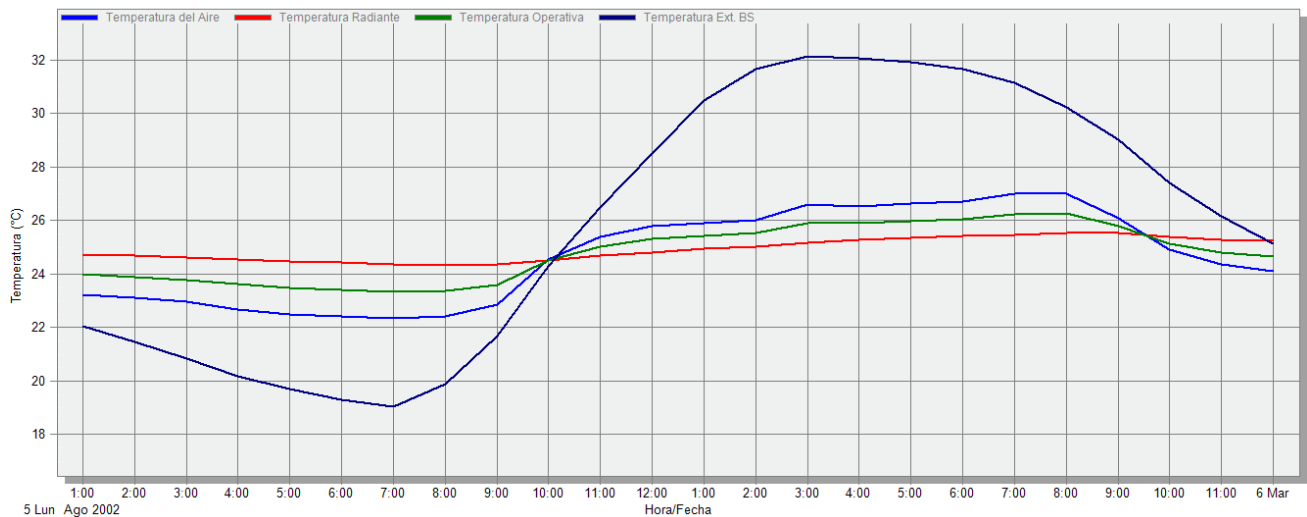
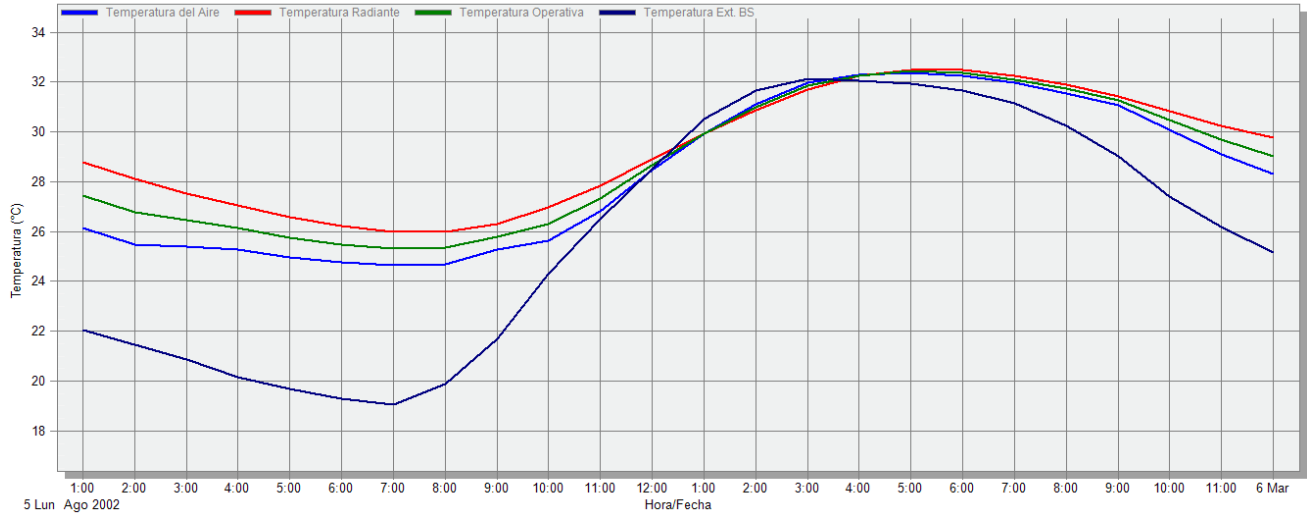


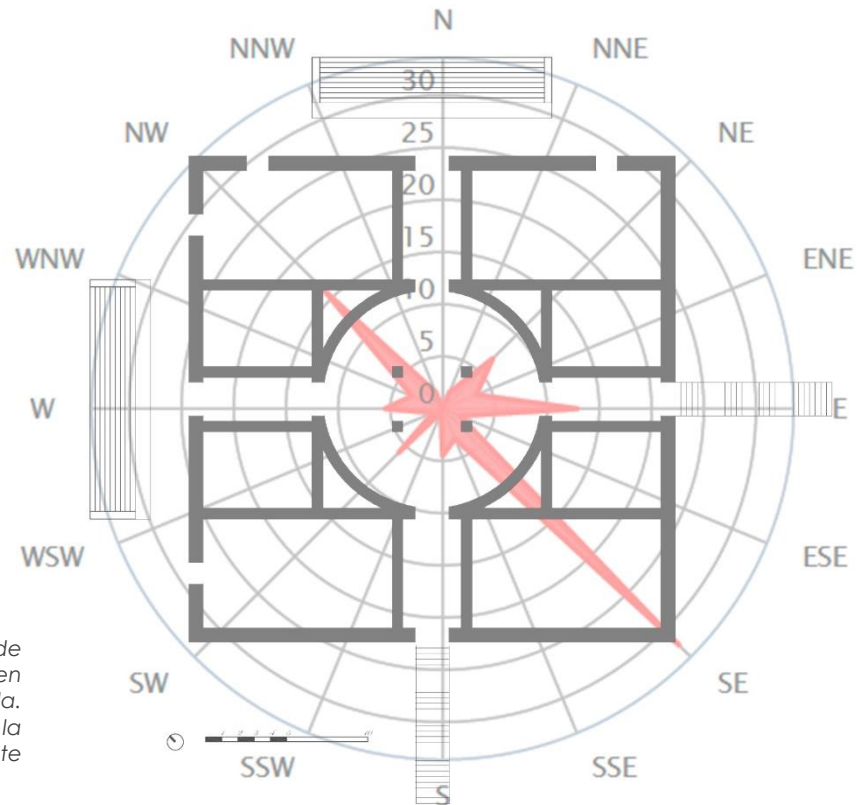
Fig. 3.183. Plano de situación.

Fig. 3.184. Planimetría y esquemas de funcionamiento.



Resultados de simulación térmica. Gráficas de temperaturas exteriores y en el interior de Villa Capra en cúpula, salón central y criptopórtico. Datos a emplear como condiciones de contorno.





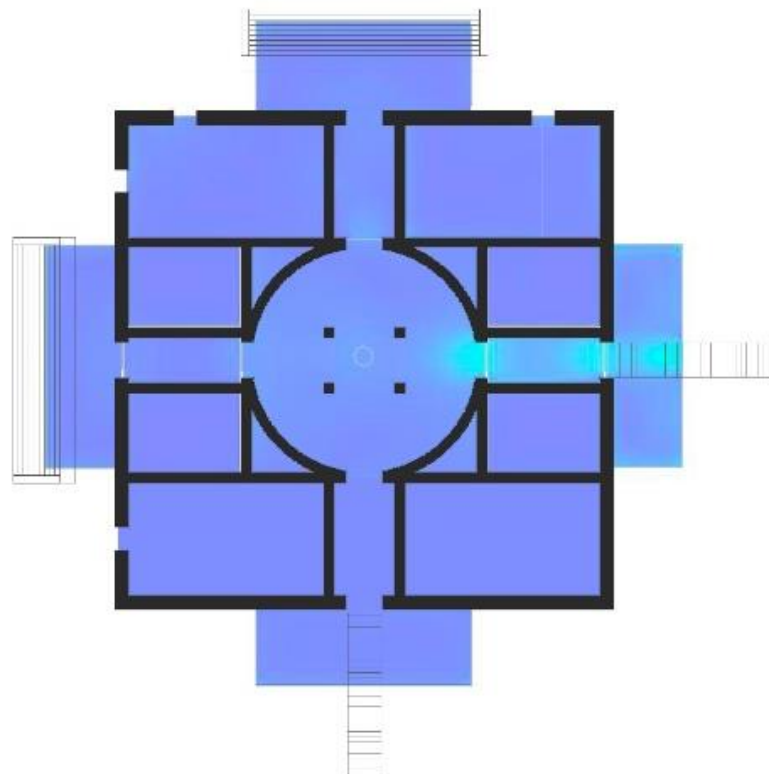
←En la página anterior:
Fig. 3.185. Gráficas de Temperaturas Exteriores y en el interior de la Rotonda. Datos obtenidos de la simulación mediante EnergyPlus para cupula.

Fig. 3.186. Gráficas de Temperaturas Exteriores y en el interior de la Rotonda. Datos obtenidos de la simulación mediante EnergyPlus para Sala.

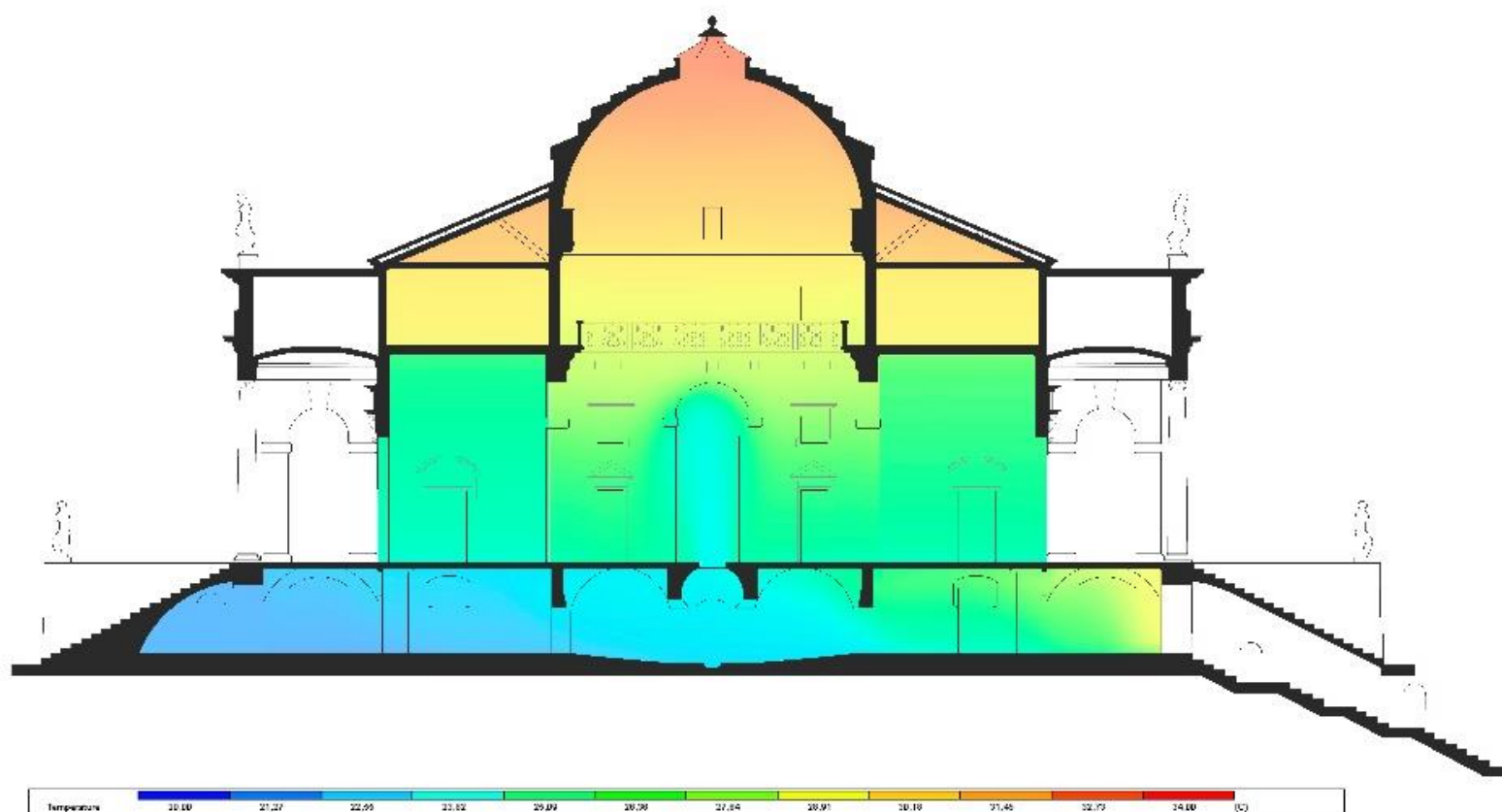
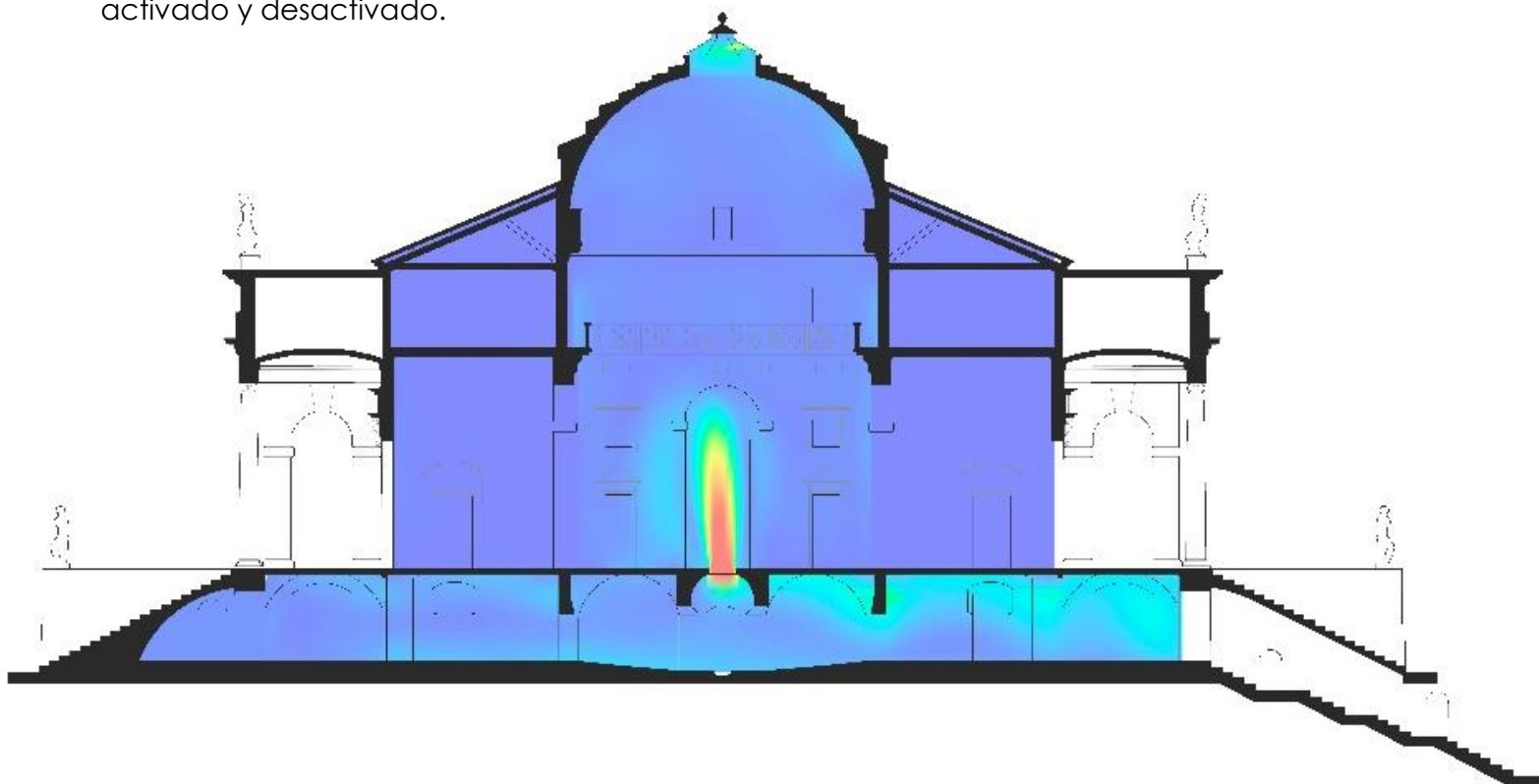
Fig. 3.187. Gráficas de Temperaturas Exteriores y en el interior de la Rotonda. Datos obtenidos de la simulación mediante EnergyPlus para Criptopórtico.

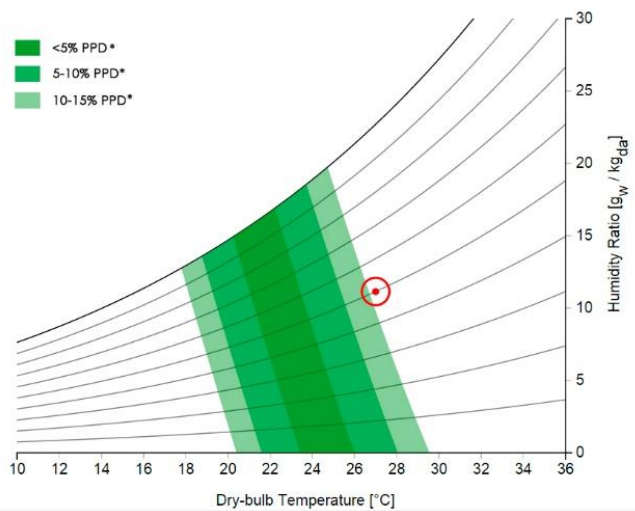
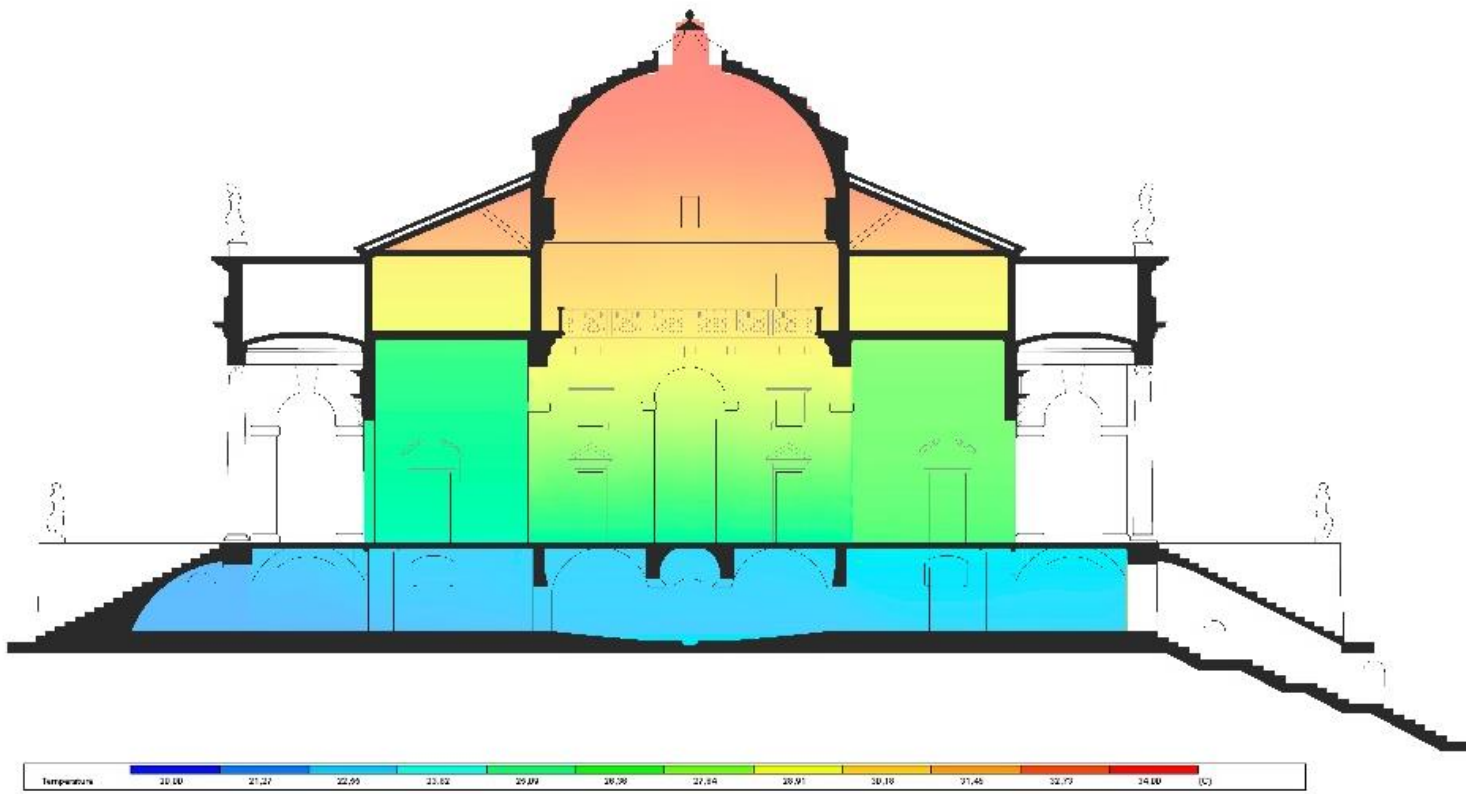
↗
Fig. 3.188. Planta superpuesta a rosa de vientos predominantes en la región.

→
Fig. 3.189. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h. Vista en planta. Velocidad de aire.



Resultados de simulación CFD gráficos de velocidad del aire y temperatura con el sistema activado y desactivado.





Figs. 3.195. y 3.196., Vistas del Exterior de la Villa Rocca Pisana.





VILLA ROCCA PISANA

Scamozzi se interesa por los sistemas de climatización de las villas de Costozza, e introduce este tipo de soluciones en la villa Rocca Pisana en la que unificaba conceptos de iluminación natural y climatización pasiva por convección natural.

Situada en el cerro más alto al noroeste de la región, la villa domina el paisaje circundante quedando totalmente independiente de los terrenos rústicos de la finca que permanecen a un nivel inferior. Se construye probablemente en el lugar donde se encontraba una antigua estructura fortificada, el volumen se resuelve mediante un cubo coronado por una cúpula semiesférica sobre un tambor octogonal.

Las fachadas se orienta hacia cada uno de los cuatro puntos cardinales, siendo todas iguales salvo la principal, orientada al sur, que se realza mediante un pórtico hexástilo de columnas jónicas incorporado en el volumen principal, y una escalera que conecta la planta baja con la principal. Los peldaños descienden hacia los terrenos rústicos, bajo las escaleras un arco permite el acceso a la planta baja. Los laterales del pórtico solo presentan dos grandes ventanales. La parte frontal se

completa con el frontón central que se eleva por encima del techo alineándose con la cornisa dentada que corona los cuatro flancos del edificio. El resto de fachadas son más sobrias y su única ornamentación sería el avance de las entradas respecto al volumen principal.

En la planta destaca el hall central, con cuatro nichos en las diagonales, cubierto por la cúpula semiesférica. Cuatro puertas adinteladas, sobre las que se sitúan a su vez cuatro óculos elípticos, comunican el hall al sur con la logia del pórtico y el resto con tres distribuidores iluminados por serlianas. El color blanco en todo su interior permite una iluminación total con luz difusa desde el óculo en la cúpula. En el centro del hall sobre en el suelo encontramos la rejilla de ventilación tallada en piedra con una doble función, dejar pasar la luz a la planta baja y la introducción de aire fresco en la estancia principal.

En torno a la sala central se disponen estancias más pequeñas, caracterizándose las que se sitúan al Norte de una menor altura y de tener chimenea. A la segunda planta se accede por unas escaleras de caracol situadas en los distribuidores Este y Oeste, en este nivel encontramos un par de pequeñas habitaciones.



Fig. 3.197. Foto aérea del conjunto en la que se puede apreciar la entrada de aire al Ventidotto.

Fig. 3.198. Vista del interior del criptopórtico.

Fig. 3.199. Detalle de Roseta de Ventilación principal vista desde abajo.



una sala redonda con cuatro pilares formados por bloques de piedra sujetando el techo abovedado coronado por la rejilla. Desde la sala situada al sur se accede al sótano en el que desemboca el conducto enterrado de ventilación, hoy día cerrado, y que permite el paso del aire a su vez con la estancia superior mediante otra rejilla de ventilación

La villa es una de las primeras obras proyectadas por Vincenzo Scamozzi, las plantas y alzados se encuentran reflejados en su tratado *L'idea della architettura universale* (1615).⁴⁵

Construida para el noble veneciano, Vettore Pisani perteneciente a la familia que encargara, algo más de 30 años antes, una villa cerca de Bagnolo a Andrea Palladio, los trabajos se inician en torno a 1574-1575 concluyéndose en el año 1576. A lo largo de la historia ha atravesado períodos de descuido y abandono, siendo bastante dañada durante la Segunda Guerra Mundial. Años más tarde comienzan los trabajos de restauración que concluyen en 1958.⁴⁶

En la Villa Rocca Pisana se mantiene el sistema de climatización natural a excepción del conducto enterrado que fue clausurado cuando la familia Ferri reabre el edificio en torno a 1978. En la Fig. 3.197 se puede observar una vista aérea con la rejilla entrada de aire al conducto enterrado y en la Fig. 3.203 vemos la entrada desde el interior de la villa al ventidotto ya tapada.

Para la simulación de esta villa analizaremos por una parte el intercambio que se produce en el ventidotto, por otra, el que se produce en el sótano y en el interior de la villa.

Fig. 3.200. Vista del interior de la sala central en la que se aprecian la rosetta de ventilación y el óculo en cubierta.

Fig. 3.201. Roseta de ventilación principal vista desde arriba.

Fig. 3.202. Roseta de ventilación secundaria que conecta la planta del criptopórtico con el sótano.

Fig. 3.203. Detalle de la entrada al ventidotto tapada en la actualidad..

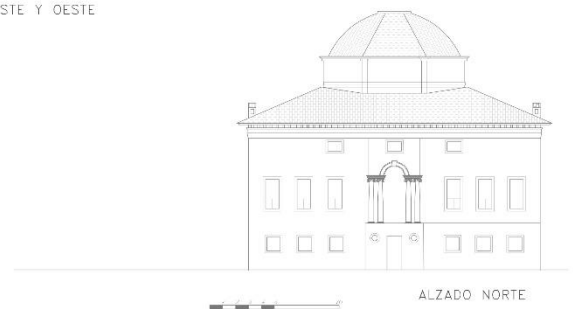
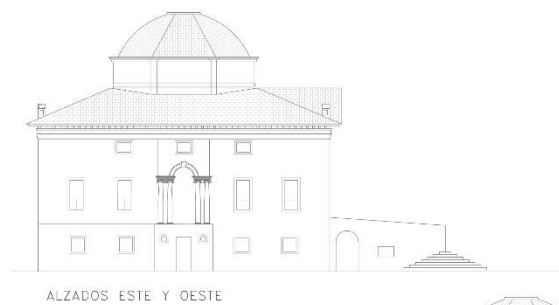
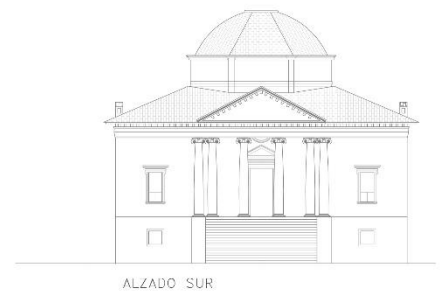
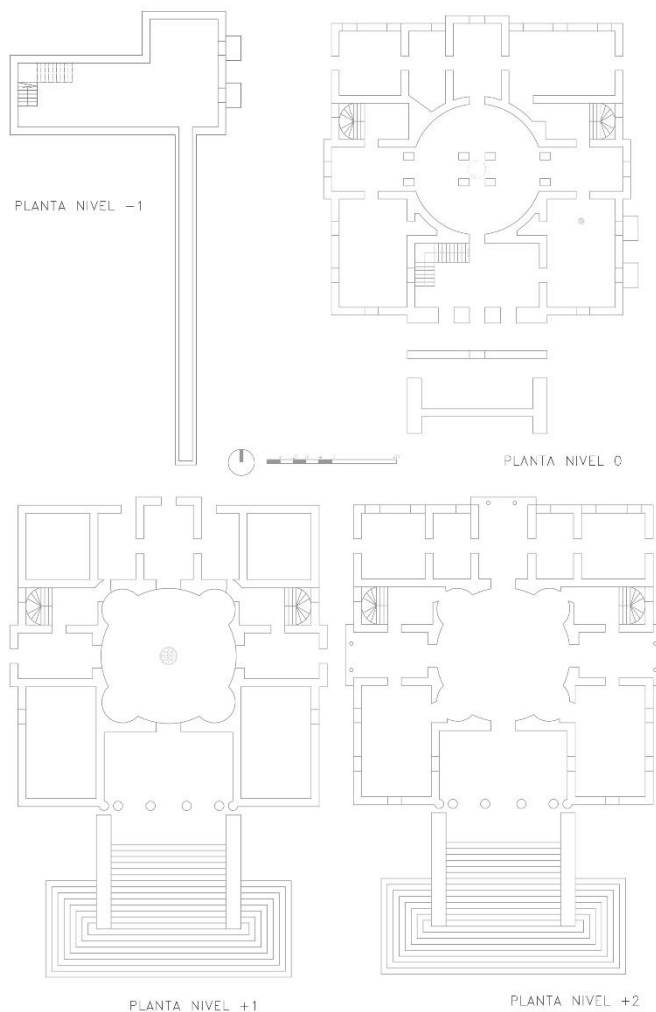
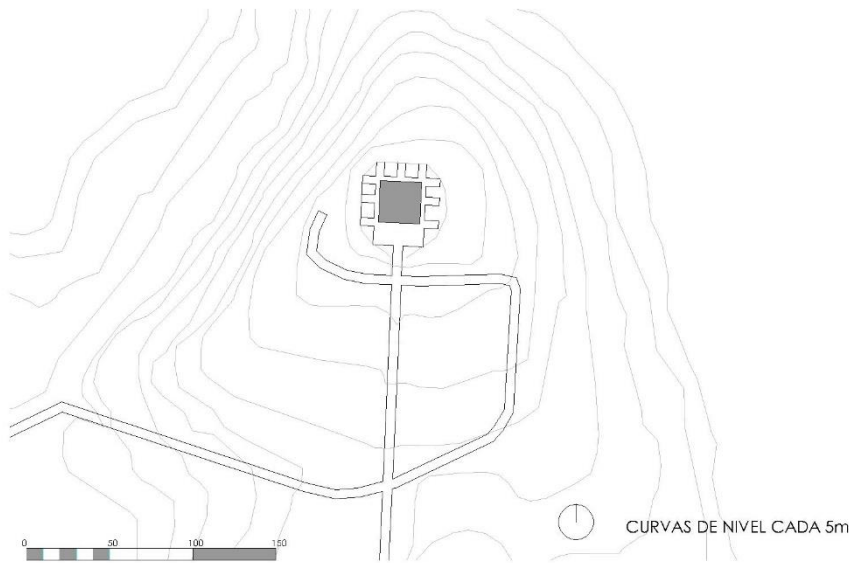
⁴⁵ SCAMOZZI, V. 1552-1616 *L'idea della architettura universale*. [Bologna] Arnaldo Forni 1982

⁴⁶ CATALOGO ISTITUTO REGIONALE VILLE VENETE. Villa Rocca Pisana.



Fig. 3.204. Plano de situación.

Fig. 3.205. Planimetría de la Villa Rocca Pisana.



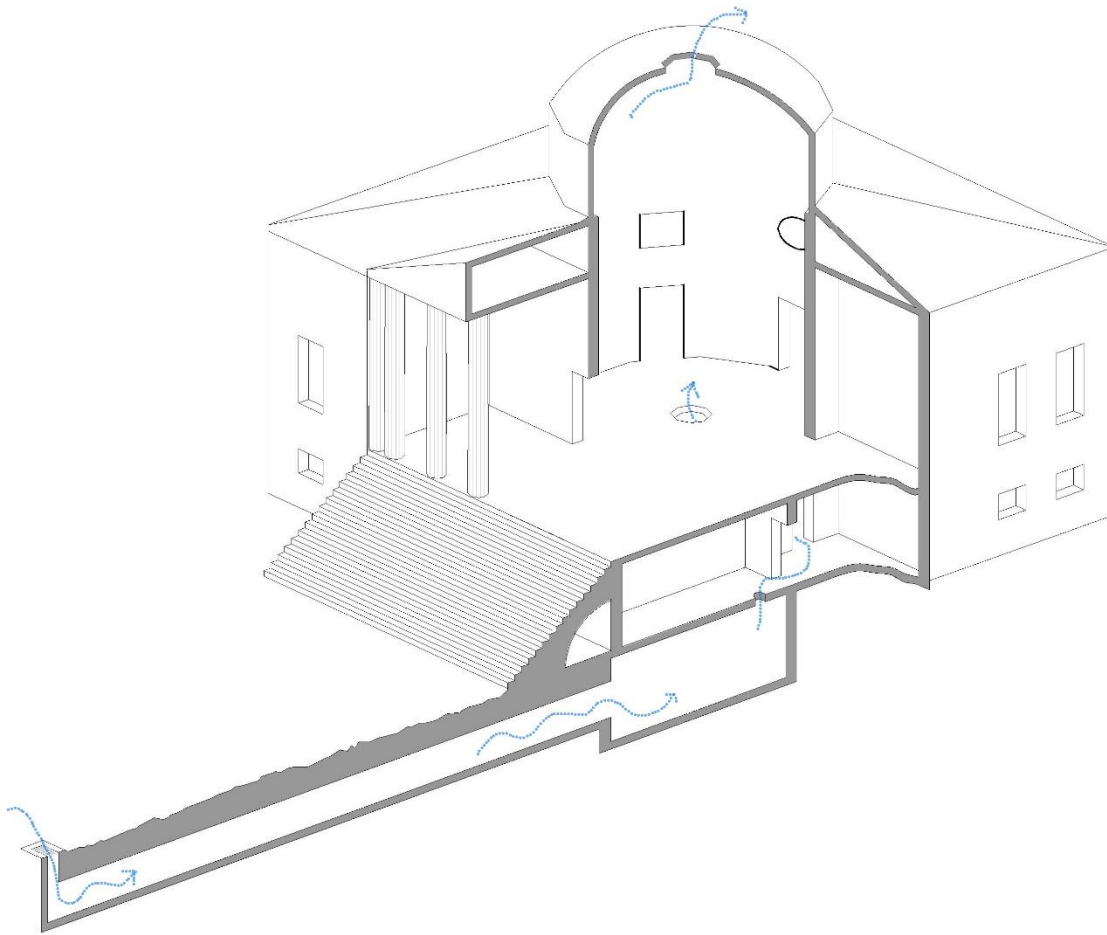
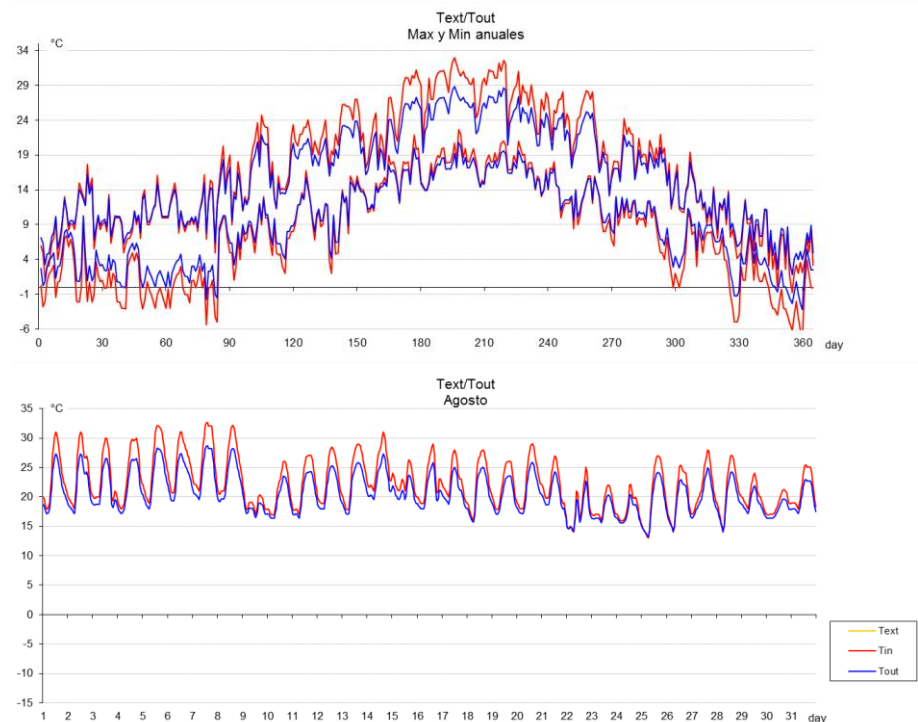


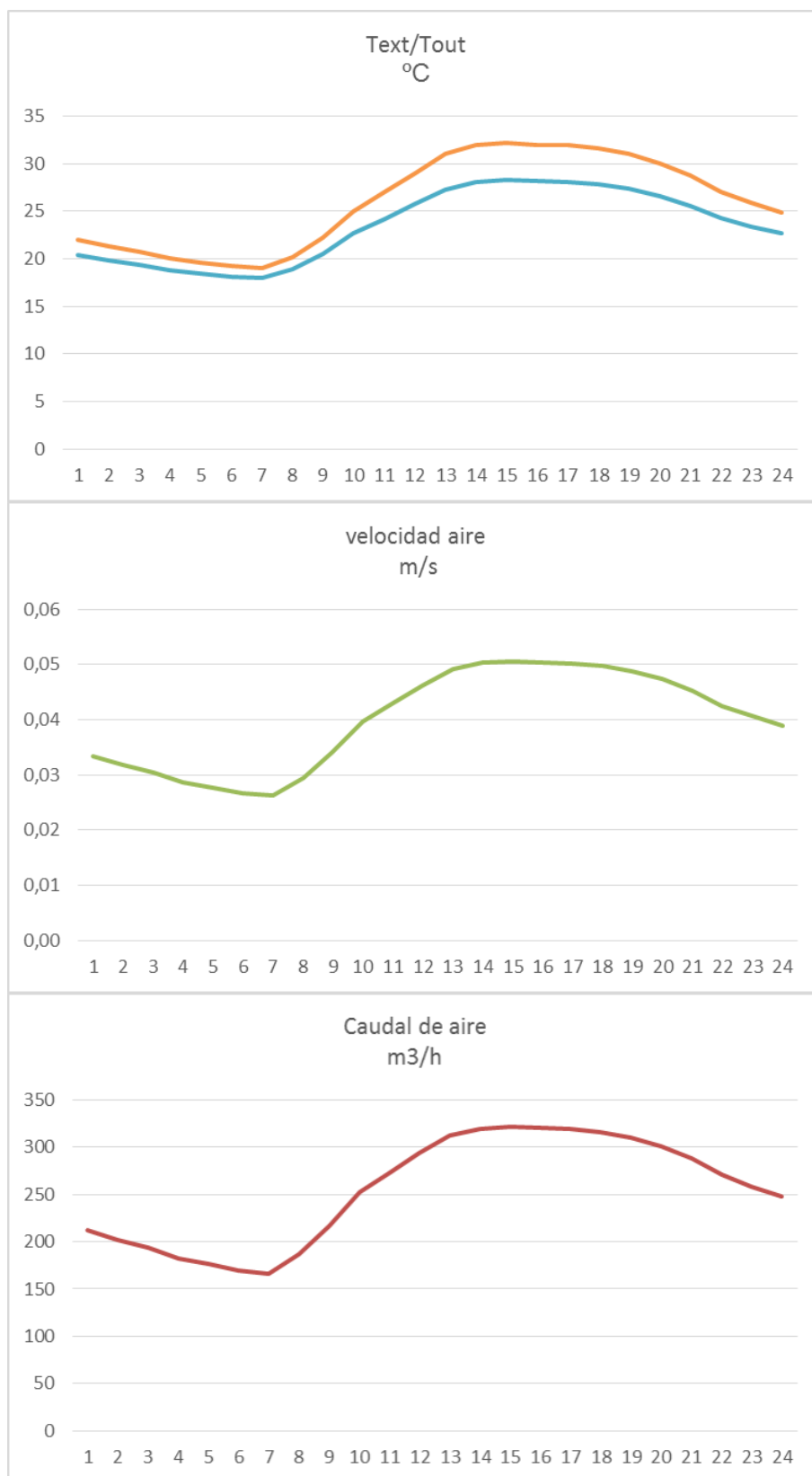
Fig. 3.206. Esquema de funcionamiento del sistema de climatización.

Fig. 3.207. Temperaturas anuales exteriores y a la salida del ventidotto de la Rocca Pisana. Resultados de simulación con herramienta de IECN..

Fig. 3.208. Temperaturas durante el mes de Agosto exteriores y a la salida del ventidotto. Resultados de simulación.

En primer lugar calcularemos con la herramienta de cálculo de intercambiadores enterrados las temperaturas y velocidades del aire a la salida del ventidotto. A continuación las gráficas de los resultados de temperatura de salida anuales, en el mes de Agosto, así como los resultados de temperatura, velocidad del aire y caudal para el día 5 del mismo mes.



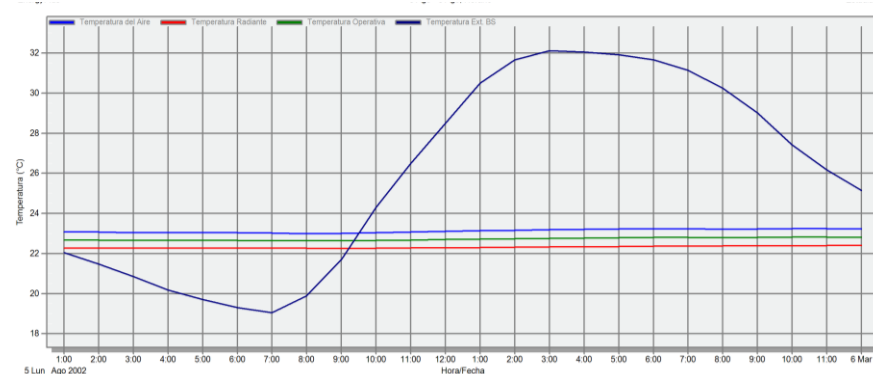
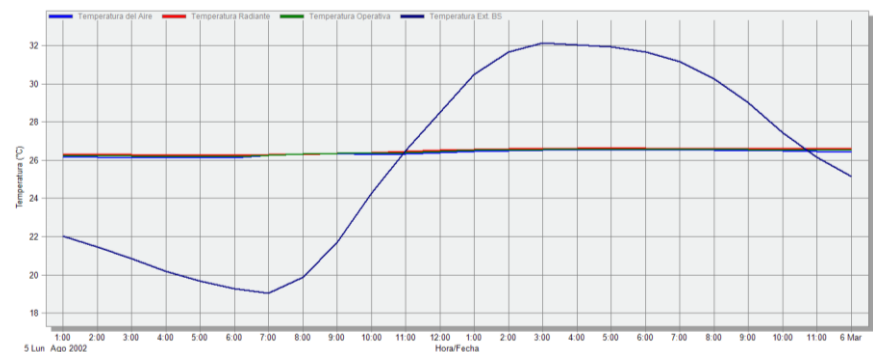
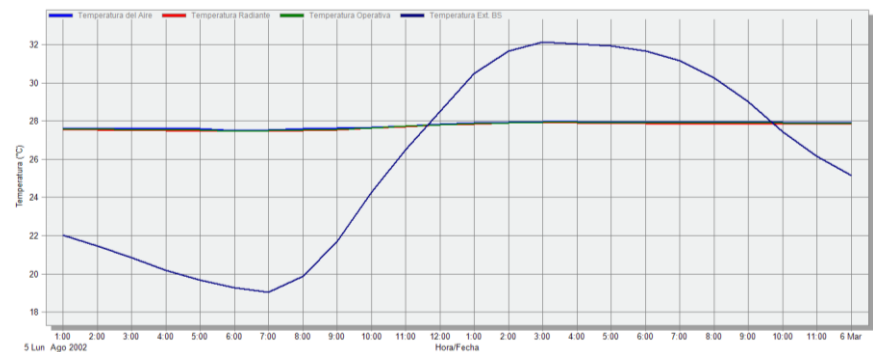
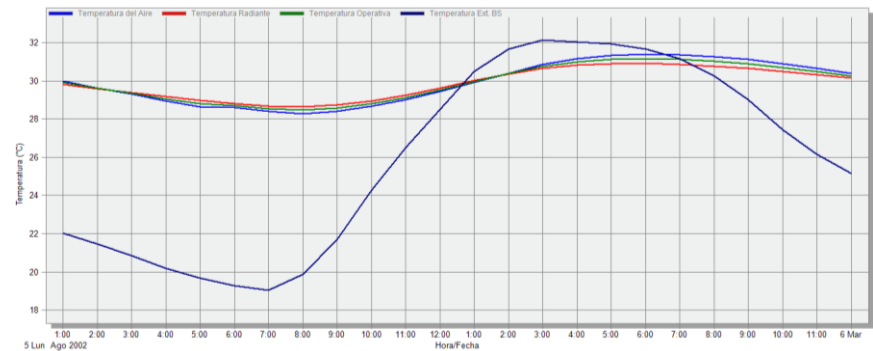


Figs. 3.209., 3.210 y 3.211., Resultados de simulación mediante herramienta de simulación de IECN. Gráficas de temperaturas exterior y a la salida del sistema, velocidad del aire a la salida y caudal de aire introducido en la Villa. Datos para el 5 de Agosto.

Por otra parte mediante Design Builder obtenemos las temperaturas en el interior de la cúpula, en la primera planta de la villa, en el salón principal en planta baja, y en el criptopórtico. Estos resultados junto con los anteriores nos servirán para las condiciones de contorno de la simulación CFD.

Figs. 3.212., 3.213, 3.214 y 3.215., Gráficas de Temperaturas exteriores e interiores en la Villa Rocca Pisana. Simulación realizada con motor de cálculo de Energy Plus. Resultados obtenidos para el 5 de Agosto en:

- Cúpula
- Planta superior
- Planta baja
- Criptopórtico



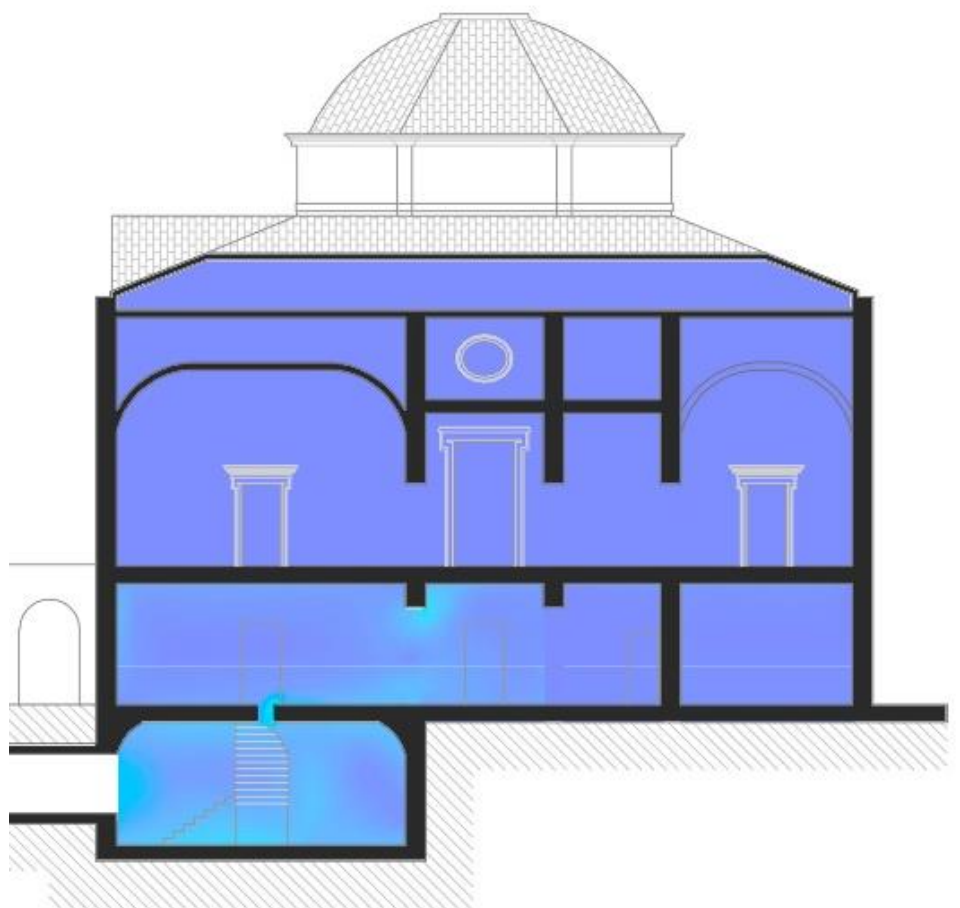


Fig. 3.216. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección con Ventidottol. Velocidad de aire.

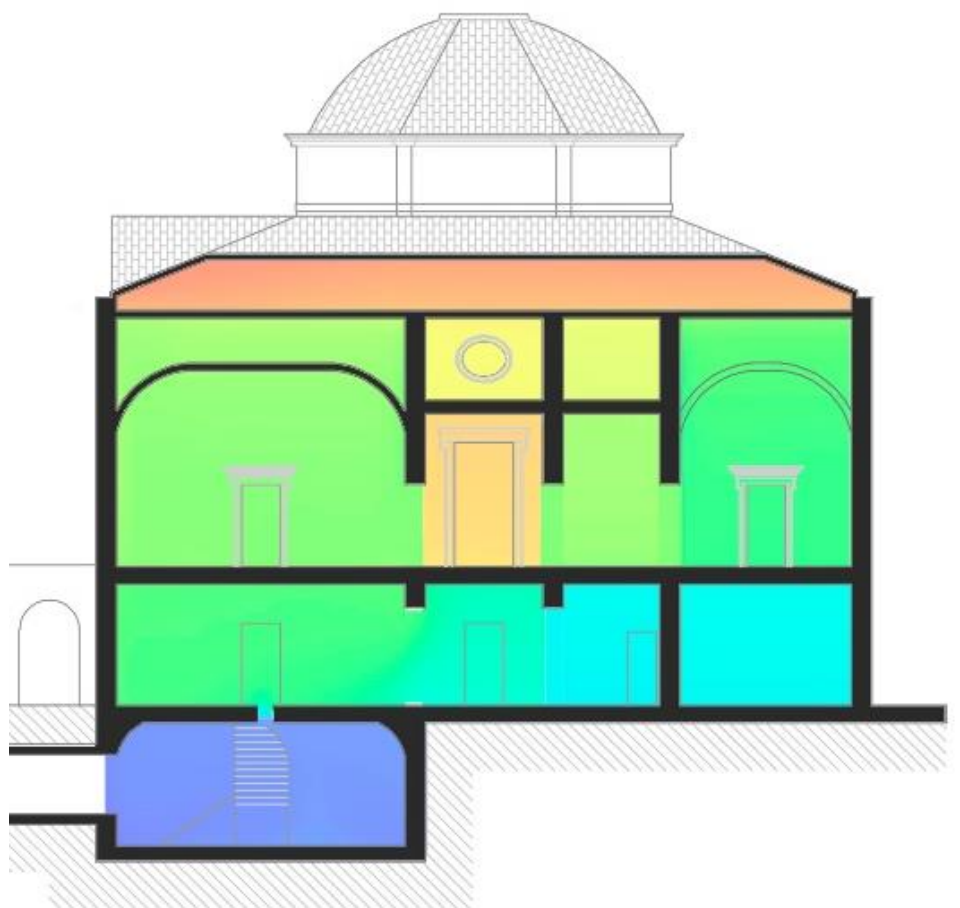


Fig. 3.217. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección con Ventidottol. Temperaturas operativas.

Resultados de simulación CFD gráficos de velocidad del aire y temperaturas con el sistema activado y desactivado.

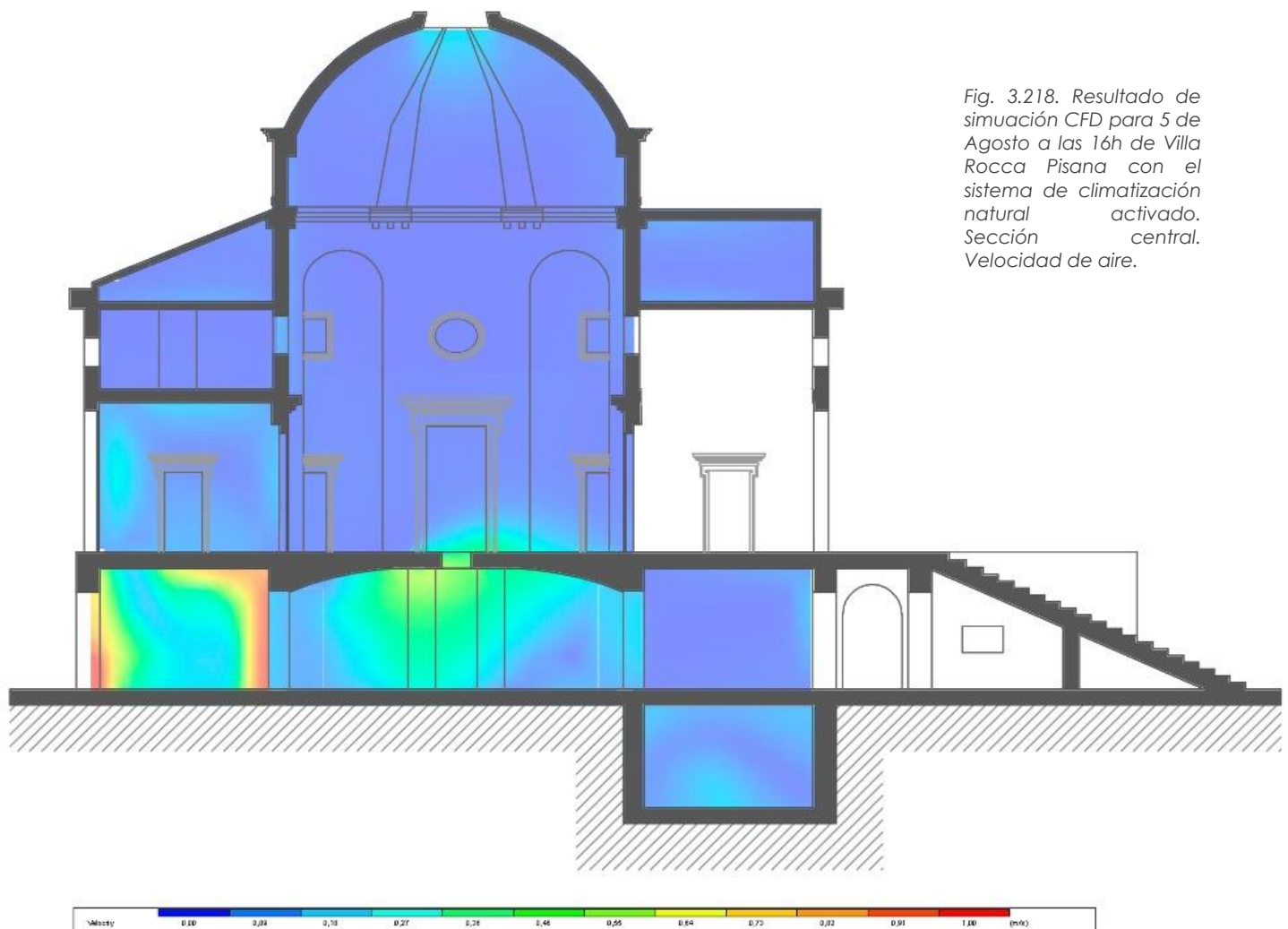


Fig. 3.218. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección central. Velocidad de aire.

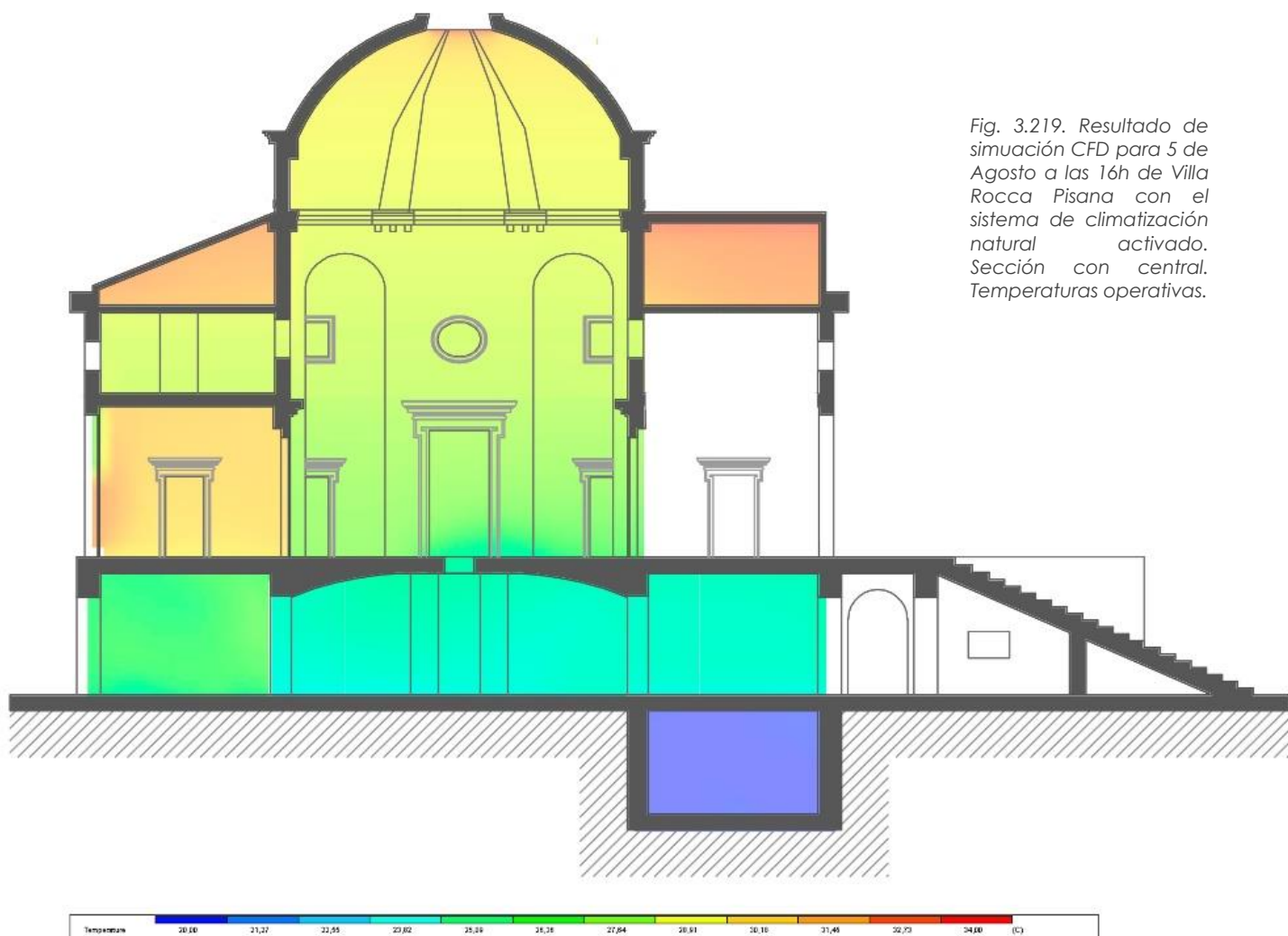
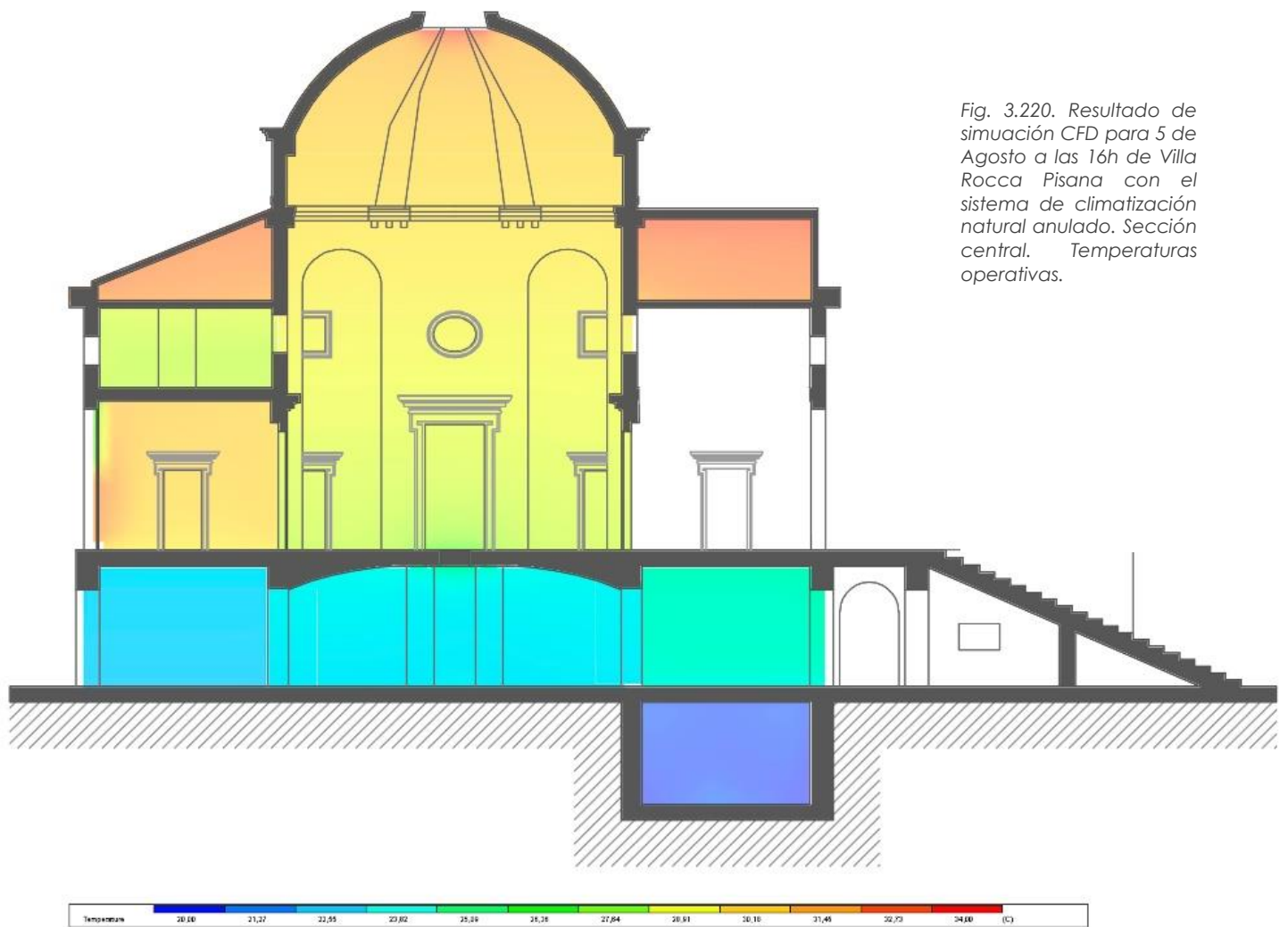


Fig. 3.219. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección con central. Temperaturas operativas.



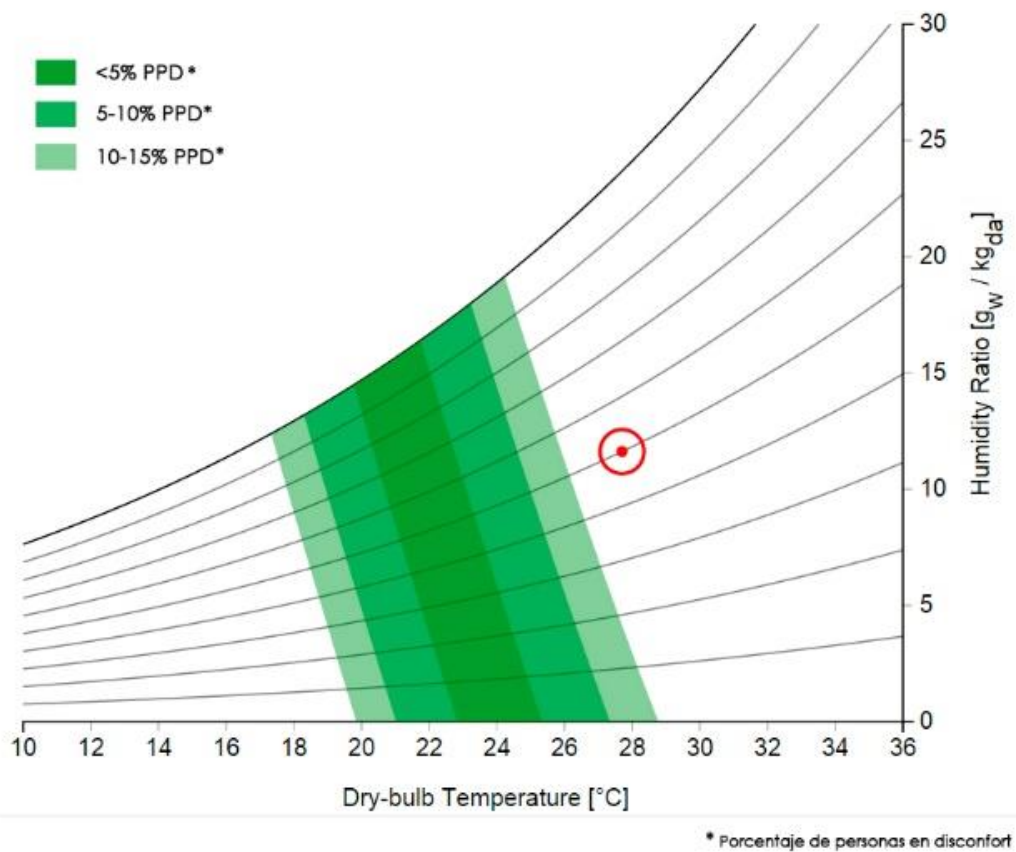


Fig. 3.221. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa Rocca Pisana sin climatización natural.

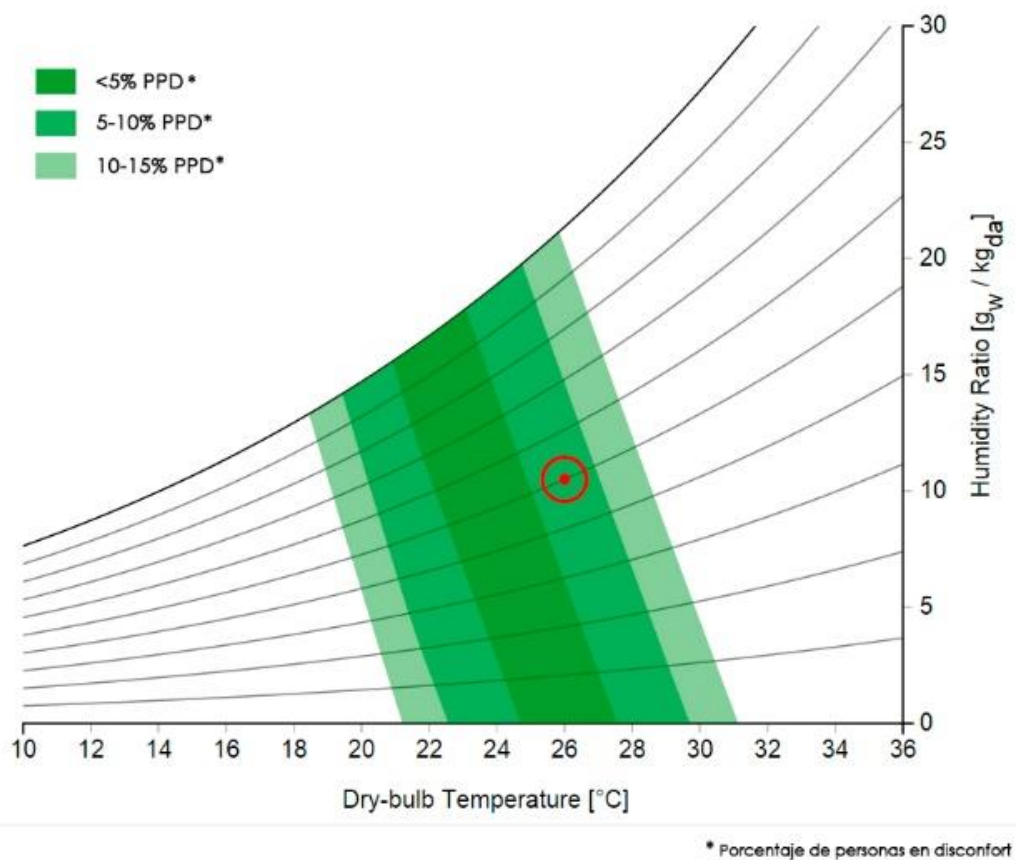


Fig. 3.222. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa da Schio con climatización natural.

De los resultados obtenidos se extraería escaso impacto que tiene el ventidotto en el conjunto del sistema.

Hemos realizado una toma de datos el 14 de Agosto de 2012 a las 15 horas en distintos puntos de la Villa obteniendo los siguientes resultados.

VILLA ROCA PISANA	
toma de datos el 14 de Agosto a las 15h	
Lugar	temperatura
Exterior	32,1°C
Criptomórtico	27°C
Planta baja espacio central central	27,4 °C
Planta primera sobre espacio central	28,9°C

En la Fig. 3.223 realizamos una comparativa entre la toma de datos y la simulación. Los resultados son bastante similares salvo la temperatura en el criptomórtico que sería unos dos grados inferior en el modelo respecto a las mediciones.



Fig. 3.223. Mediciones realizadas en la villa Rocca Pisana el 14 de Agosto de 2012, comparativa con modelización.

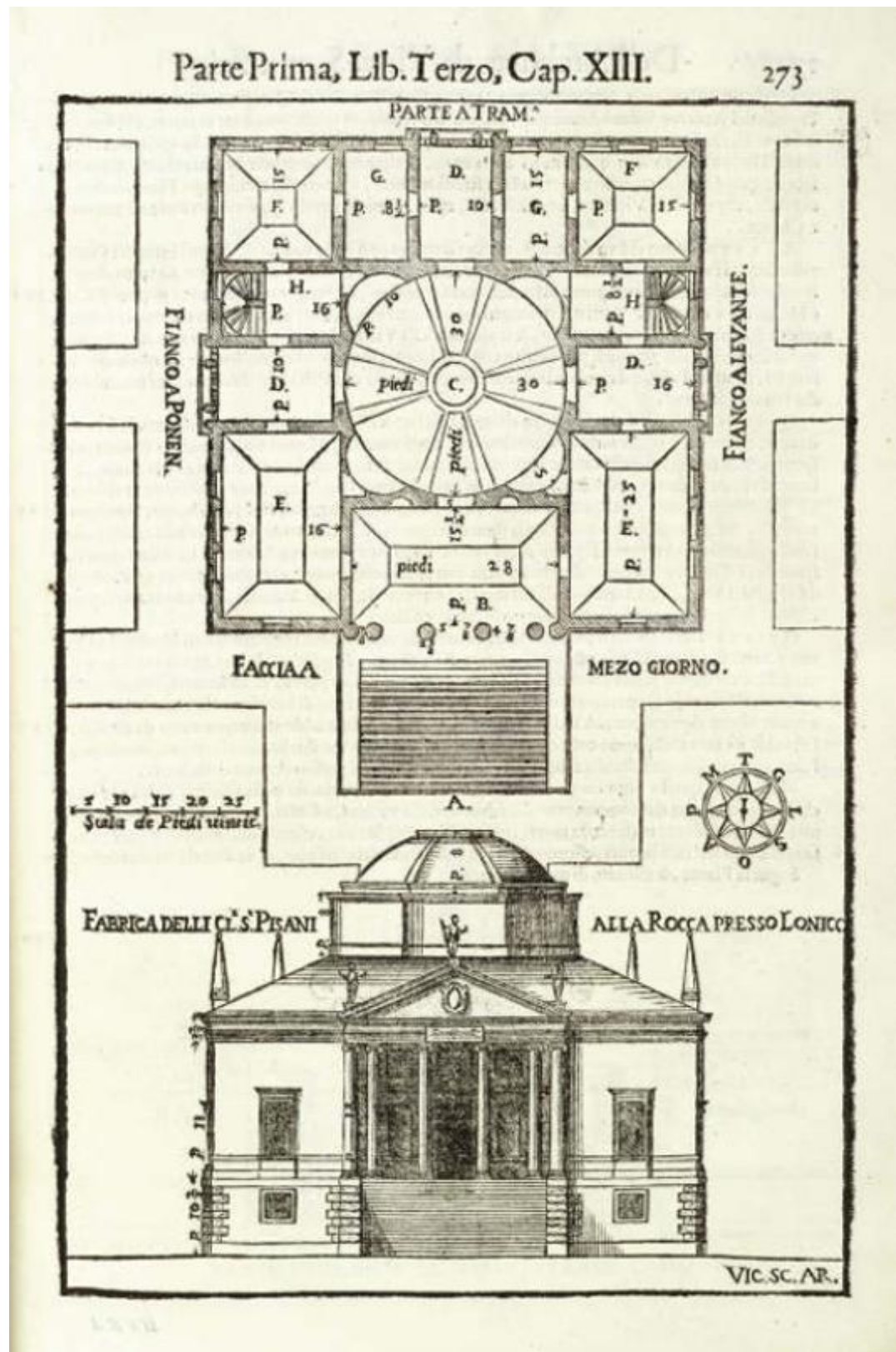


Fig. 3.224. Planimetría de la Villa Rocca Pisana según Vincenzo Scamozzi.

3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Una vez concluidas todas las simulaciones pasaremos a estudiar la incidencia de los elementos de climatización pasiva en las condiciones de confort en el interior de los espacios naturalmente climatizados en comparación con las condiciones en el caso de no existir estas soluciones.

Para ello trabajaremos con los estándares del ASHRAE 55 del año 2013 por el que se definen unas condiciones de confort para espacios naturalmente ventilados. El ASHRAE 55 establece los rangos de confort interior aceptables para una mayoría de los ocupantes.

Para este análisis consideraremos unas condiciones metabólicas para los usuarios de 1,2 correspondientes a una actividad equivalente a estar de pie relajados con una vestimenta normal para verano.

Pasaremos entonces a analizar individualmente cada una de las Villas. Nos centraremos exclusivamente en los espacios naturalmente refrigerados.

Antes de proceder a realizar un análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones resulta interesante la lectura de los siguientes escritos elaborados por Vincenzo Scamozzi refiriéndose a los Ventidotti de Costozza:

“Los hombres llenos de lujos y deleites, como puede ser el romano Lucio Lucullo, y tantos otros hombres, se encuentran en la búsqueda de mil facilidades para recibir frescor en tiempos estivales. En nuestro tiempo se han realizado en algunos lugares, estancias frescas, llamadas Ventidotti, destinadas a ser utilizadas en tiempos de los efluvios calurosos; sin embargo debo advertir que toda cosa violenta es contraria a

nuestra naturaleza, y resulta difícil adaptarse a ella, debe estar en consonancia con el lugar, el clima y realizarse con buen juicio..."

"En nuestros tiempos son famosos los Ventidotti de Costozza...en ellos, el viento es casi demasiado abundante y violento, tanto que, con este placer más de uno ha enfermado, por tanto no elogio tales excesos, sino que los lugares aporten un frescor atemperado, adaptado a la naturaleza y no al contrario..."⁴⁷

Del mismo modo Scamozzi, propone una mejora a la idea de Trento más acorde con criterios de habitabilidad, eliminando todo aquello que resulta excesivo y por tanto nocivo para la salud, y de ahí surge la siguiente sugerencia de cómo construir estas "Stanze del vento":

"...Estos espacios deben estar parcialmente enterrados, apenas un poco, en lugares secos, lejos de cualquier humedad. Si los hacemos totalmente enterrados, y conectados en el centro de la sala con otros lugares, deben estar orientados hacia la parte de Tramontana. La forma será como la de una estancia, o rotonda, o cuadra, o respondiendo a cualquier geometría pero no muy grande, con el fin que el frescor introducido se conserve bastante. Es importante que sea luminoso y claro mas no con grandes puertas o ventanas, y estas deben tener vidrios claros y transparentes.

Es positivo que tenga muros gruesos, forjado de poco espesor y que esté cubierto por una bóveda. Para evitar artificios y que lo que

⁴⁷ Vincenzo Scamozzi. L'Idée della Arqu. Pag. 329-330

albergue sea durable, estos lugares, si se desea, pueden adornarse con nichos con estatuas, objetos en piedra o conchas marinas, colocados con un cierto orden, preferiblemente con un aspecto más natural que magistral y exquisito..."

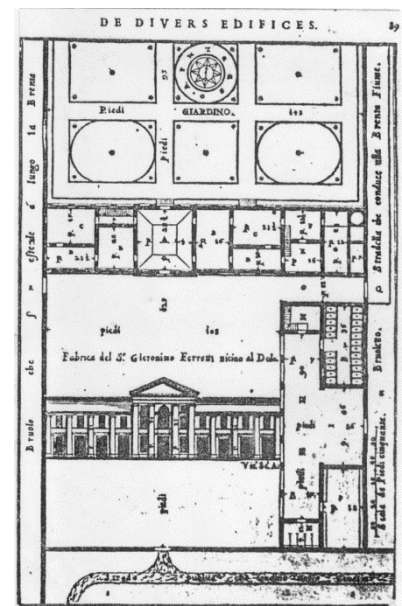
48

De lo que se extrae de los textos de Scamozzi, es necesario subrayar que el orden de la "stanza del vento" ha de ser diferente del de la sala superior. El de la primera debe estar muy conectado a la naturaleza y el de la segunda al arte. El contraste entre estos dos estilos se ve con claridad tanto en la villa Eolia, como en la Rocca Pisana o en la Rotonda.

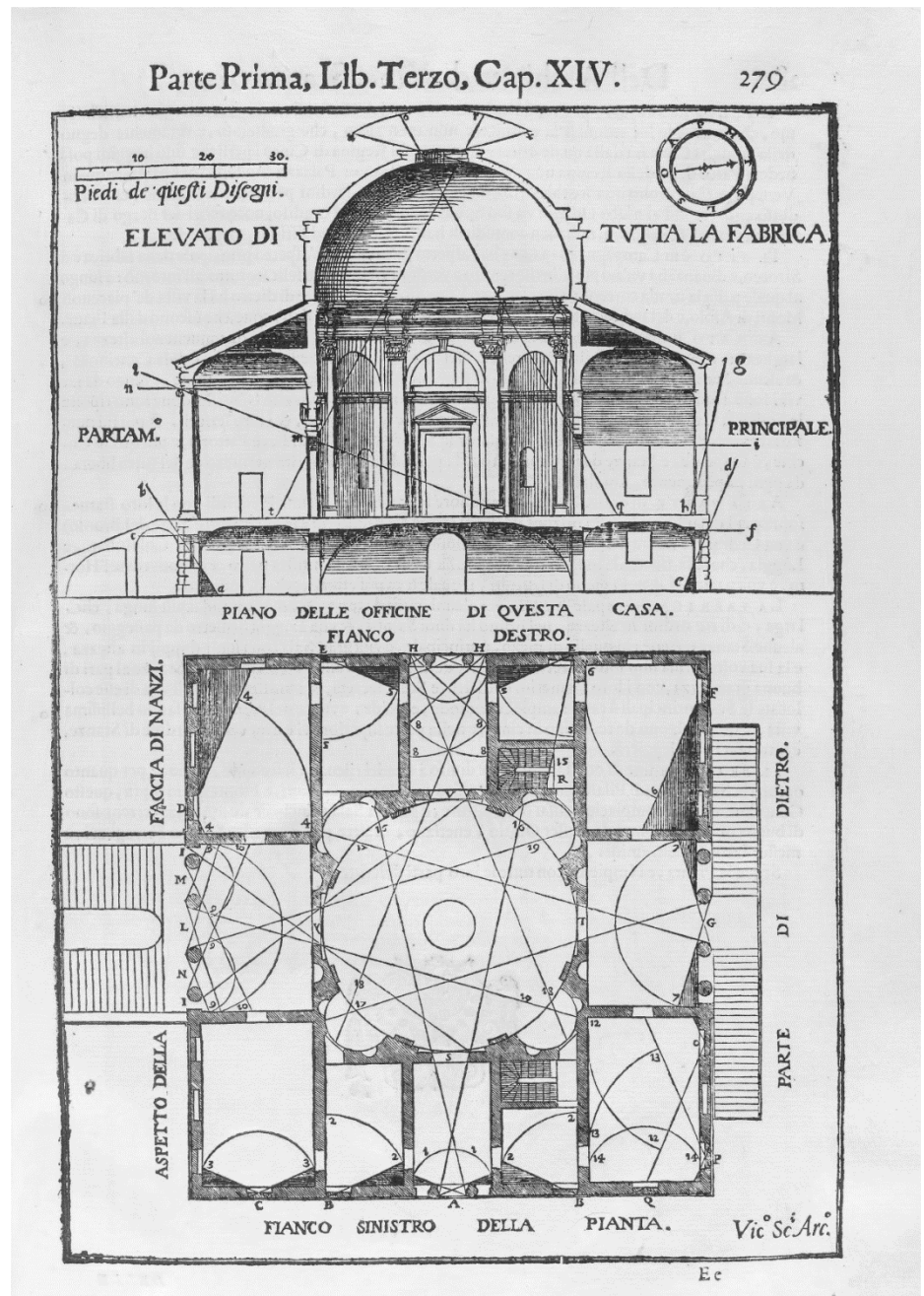
Refiriéndose a esta conexión entre la naturaleza y el arte resulta interesante la observación que hace Semenzato¹ sobre la Rotonda:

"...el genio faunescos que Palladio ha colocado... en el centro de la sala central, única voz... lejana como las verdaderas voces provenientes del bosque, cuya naturaleza puede responder también a los instintos y no sólo a la razón..."

Figs. 3.225. y 3.226. Villa Dolo Fachada y Planimetría. En esta villa junto con la Villa Bardellini Scamozzi reproduce un sistema similar de climatización natural al de la Rocca Pisana. En el jardín que aparece en la planimetría podemos ver ilustrada una rosa de los vientos.



⁴⁸ Vincenzo Scamozzi. L'idea della Arqu. Pag. 329-330



Figs. 3.227. y 3.228. Planimetría y Fachada de la Villa Bardellini en Monfumo. Esta villa además de presentar un sistema de climatización natural similar al de la Villa Rocca Pisana resulta interesante por la especial atención que pone a la iluminación natural que se puede apreciar tanto en sección como en planta.

En la tabla resumen que se muestra a continuación se pueden valorar los resultados en función de criterios de confort en el interior de los distintos espacios.

Se han introducido los resultados obtenidos de las distintas villas sin el sistema de climatización natural y con el sistema de climatización natural activo.

- SIN CLIMATIZACIÓN NATURAL
● CON CLIMATIZACIÓN NATURAL

Y se han clasificado según se encuentren en:

- disconfort por exceso de frío
- confort -2 (fresco)
- confort -1 (ligeramente fresco)
- confort
- confort +1 (ligeramente caluroso)
- confort +2 (caluroso)
- disconfort por exceso de calor

MOR 1: MORLINI PLANTA 1

















MOR 2: MORLINI PLANTA 2

TRE 1: TRENTO CARLI SALA DEL COVOLETTO

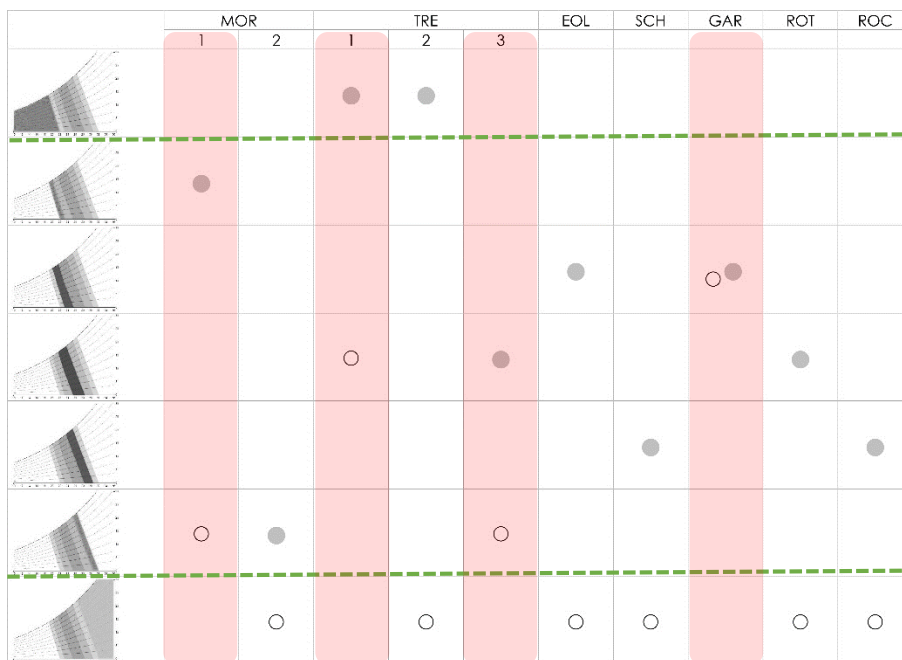
TRE 2: TRENTO CARLI SALÓN PRINCIPAL

TRE 3: TRENTO CARLI SALAS

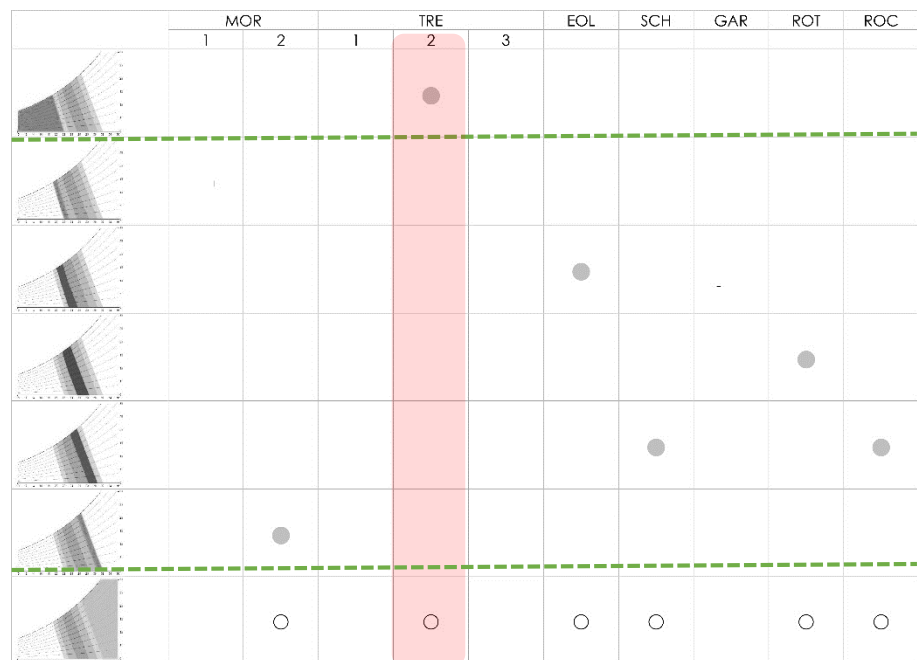
	MOR	
	1	2
	●	
	○	●
		○

TRE			EOL	SCH	GAR	ROT	ROC
1	2	3					
							
					 		
							
							
							
							

En primer lugar observamos que el sistema mejora la condición de confort en casi todos los casos, incluso hay villas en las que un sistema de refrigeración pasiva resulta innecesario ya que en un principio la propia arquitectura aportaría unas necesidades de confort admisibles. La única excepción sería el Villino Garzadori que al encontrarse excavado en la roca no modifica las condiciones termicas en su interior al ingresar aire fresco. Por lo que las soluciones en las que las condiciones de confort ya eran admisibles antes de incorporar el sistema podrían perfectamente obviarse. Es el caso del Villino Garzadori, de la primera planta de la Villa Morlini Trento, de la Sala del Covoletto y de las salas laterales de la Villa Trento Carli.



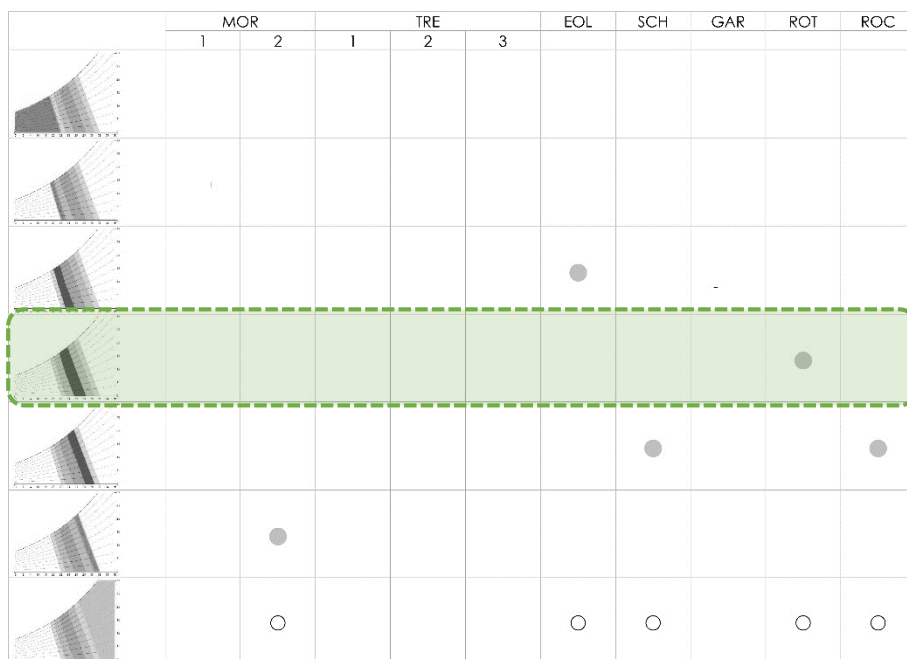
Es destacable también el hecho de que en la Sala del Covoletto las condiciones pasarían de encontrarse dentro de un confort admisible a un disconfort por excesivo frío. Este último sería también el caso del Salón Principal también de la Villa Trento Carli, que aún partiendo de unas condiciones iniciales más calurosas la solución estaría claramente sobredimensionada.



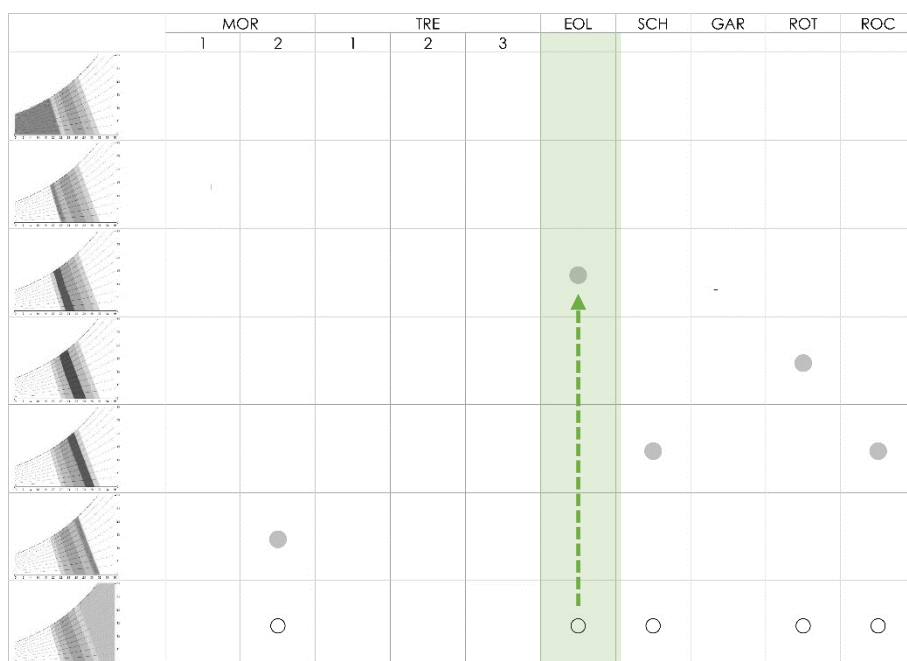
Probablemente son aquellas soluciones a las que se refería Vincenzo Scamozzi en su texto. En el caso de la Sala del Covoletto el sistema sería regulable sencillamente abriendo o cerrando la puerta que comunica con el mismo, pero en el caso del Salón principal el sistema no era regulable por lo que se justificaría la anulación del sistema por parte de los residentes, desde la utilización de tapices (como se hizo en un principio) hasta el cierre definitivo de los conductos.

Vemos como los restantes casos mejoran notablemente el confort gracias a los sistemas de refrigeración pasivos.

Desde el punto de vista de un confort térmico óptimo la villa que mejor respuesta daría sería La Rotonda.



Sin embargo si priorizamos la eficiencia de los sistemas basada en un mayor abatimiento térmico obtendríamos que en este caso la solución óptima la encontraríamos en la Villa Eolia.



Las conclusiones por tanto que podrían sacarse de este primer estudio de las villas pneumáticas serían las siguientes:

- La calidad del aire en los edificios no es un problema nuevo, desde antiguo se analizó esta problemática y se aportaron soluciones principalmente basadas en un aprovechamiento de la inercia térmica del suelo, una enorme fuente de energía al alcance del ser humano en cualquier parte del mundo.
- Las villas pneumáticas del Renacimiento suponen un ejemplo claro de una integración de la climatización pasiva basada en geotermia solar o geotérmica de baja profundidad en los edificios respetuosa con el entorno y con la belleza arquitectónica.
- Hemos podido demostrar hasta qué punto funcionan las soluciones aportadas por Francesco di Trento, Palladio o Scamozzi gracias modernas herramientas de simulación modelización informática.
- La climatización natural en los edificios debe ser contemplada desde el diseño global los edificios, el uso de sistema pasivos y el aprovechamiento de recursos naturales puede ser perfectamente integrado en la arquitectura. Sin embargo la integración de estas soluciones no es suficiente, es preciso que funcionen, para lo cual el uso de herramientas informáticas permite la validación y optimización de las mismas.
- Gracias a la herramienta aportada en esta investigación podemos realizar un prediseño de sistemas de climatización basados en geotermia solar de manera sencilla y con resultados bastante adecuados, lo que nos permitiría ahorrar tiempo en complejas simulaciones de dinámica de fluidos en fase de diseño.

4 APLICACIÓN DE INTERCAMBIADORES TIERRA-AIRE A CLIMAS TROPICALES.

Tal y como se plantea en la definición de los objetivos, un aspecto de especial interés es la aplicación de los sistemas estudiados al diseño arquitectónico. En este apartado estudiaremos distintas soluciones y buscaremos aquellas de mayor eficiencia mediante herramientas de simulación. Posteriormente contrastaremos los resultados con mediciones.

Nos centraremos en la aplicación de intercambiadores enterrados unidos a sistemas de ventilación natural para climas tropicales.

Las principales características de los climas en los que vamos a trabajar son las siguientes:

- Temperaturas prácticamente constantes a lo largo de todo el año, por lo que no existiría desfase térmico estacional.
- Humedades relativas muy altas.

Según Hollmuller⁴⁹ la disipación térmica estacional se produce en un radio de 3 metros en torno a los intercambiadores y la disipación térmica día/noche en un radio de 30 centímetros. Por este motivo no será necesario realizar excavaciones de mucha profundidad.

⁴⁹ HOLLMULLER P. Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Directeur Pr Nicolas Gisin. Tesis No 3357. Genève, 2002.

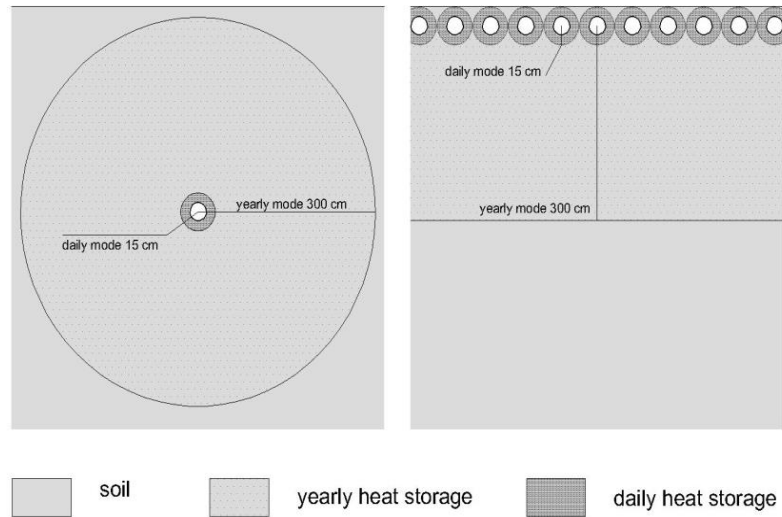


Fig. 4.1. Almacenamiento térmico del suelo según Hollmuller.

Vamos a analizar tres casos prácticos de sistemas de intercambiadores enterrados en función de su geometría, del material del intercambiador y del material de intercambio.

En los tres casos trabajaríamos con un sistema mixto compuesto por intercambiadores tierra-aire y sistemas de extracción en cubierta mediante lucernarios.

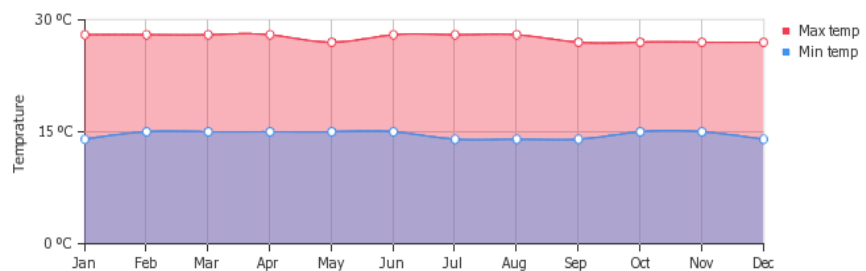
Se trataría de tres construcciones de similares características:

- Uso industrial;
- Altas temperaturas y humedades relativas;
- Requerimientos térmicos complejos ya sea por elevadas temperaturas

4.1 CASO PRÁCTICO 1 – Nave industrial en Cali (Col)

La instalación de este caso práctico se efectuó en Cali (Colombia), el clima se caracterizaría por temperaturas y humedades relativas muy elevadas.

Fig. 4.2. Cali, Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales



Se realizará la instalación de dos conductos de sección circular de 500 milímetros de diámetro de hormigón⁵⁰ y una longitud de 40 metros. La profundidad a la que se enterrarán será de 2 metros y la separación entre las paredes de los tubos de 0,1 metros.

Los caudales de renovación necesarios los calcularíamos en función de la disipación de calor necesaria dentro del espacio a aclimatar.

En primer lugar hallamos el calor que sería necesario evacuar en función de las cargas térmicas.

ITEM	ganacia de calor /m2 en W	area/pe r/un	W TOTAL	Kcal/h
cubierta en teja sandwich deck	5,8	0	0	
cubierta en teja termoacustica ajover	30	0	0	
cubierta en plca green roof	14,8	0	0	
teja termoacustica ajover/cindu	20	0	0	
muro interior clinica ac	20	107,1	2142	
muro exterior en bloque	30	0	0	
transferencia por esp adyacentes bajo	40	42,5	1700	
transferencia por teja transparente policarbonato k= 2,5	400	0	0	
transferencia por vacio-placa inferior	50	28,08	1404	
transferencia por placa piso bajo 1	40	138	5520	
por piso	6,6	0	0	
metabolico	90	16	1440	
luminarias	75	14	1050	
claraboya transúcida	400	0	0	
claraboya por teja transp termica (doble celda)	280	0	0	
equipos computadores	200	0	0	

⁵⁰ La elección del material de los conductos se justificó porque la elevada inercia térmica que tiene el hormigón podría resultar favorable al intercambio.

TOTAL CALOR A EVACUAR			13906	33274
------------------------------	--	--	--------------	--------------

A partir del dato de calor a evacuar calculamos el caudal necesario para dicha disipación mediante la ecuación:

$$C = \frac{P}{D \cdot \gamma_a \cdot (T_e - T_i)}$$

Siendo:

C = Caudal (m3/h)

P = Potencia o flujo de calor disipado (Kcal/h)

D = Densidad del aire, 1.2 Kg/m3 aproximadamente, o según el diagrama psicrométrico.

γ_a = Calor específico del aire = 0.24 Kcal/Kg °CC

T = Temperatura seca (°C)

Con lo que obtendríamos unos caudales necesarios de unos 11000 m3/h, es decir de unos 6500 m3/h por conducto, lo que supondría una velocidad del aire a lo largo del conducto de 2,3 m/s.

El suelo en el que trabajaríamos sería de composición principalmente arcillosa altamente saturado.



Fig. 4.3. Alcatek Cali.
Conductos enterrados.

En las figuras Fig. 4.4 y Fig. 4.5 vemos los resultados de la simulación analítica mediante el modelo de Benkert, Hedidt y Schöler del sistema enterrado.

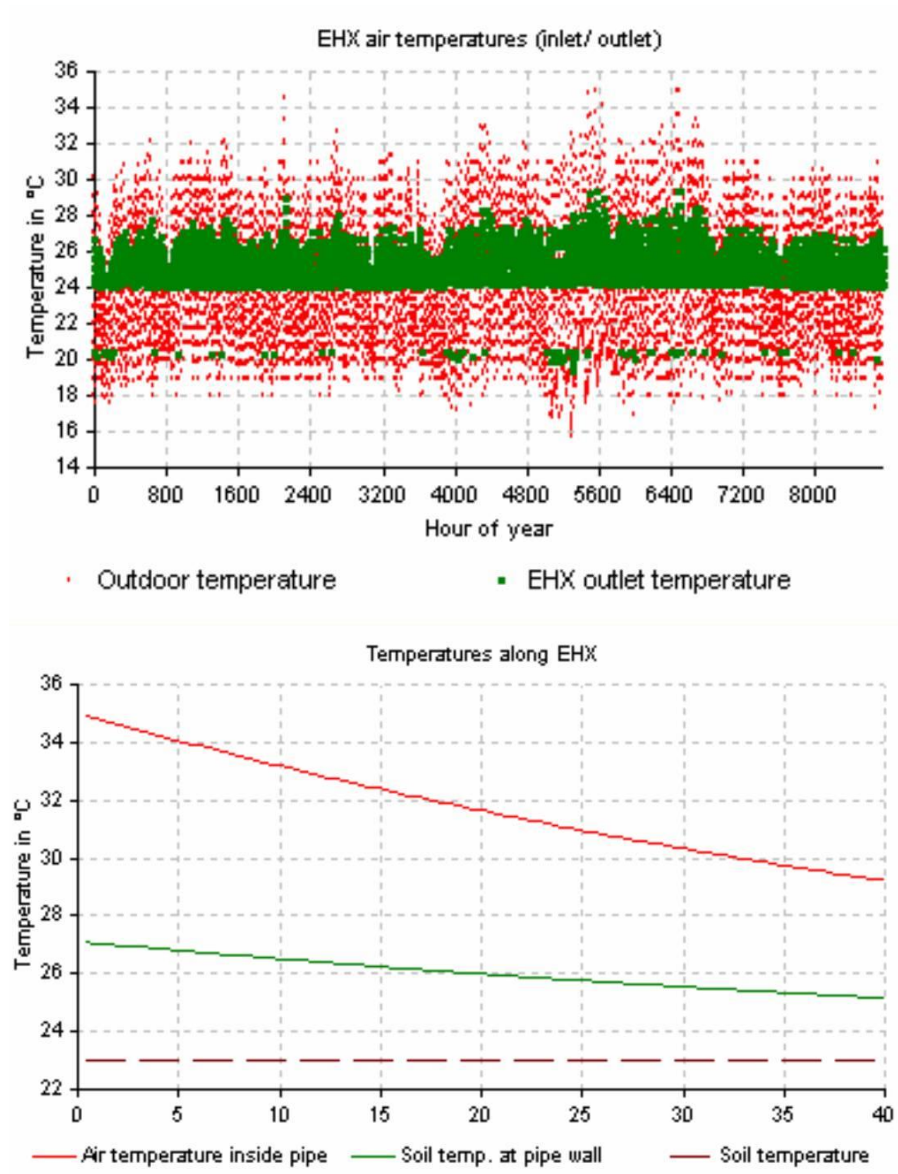
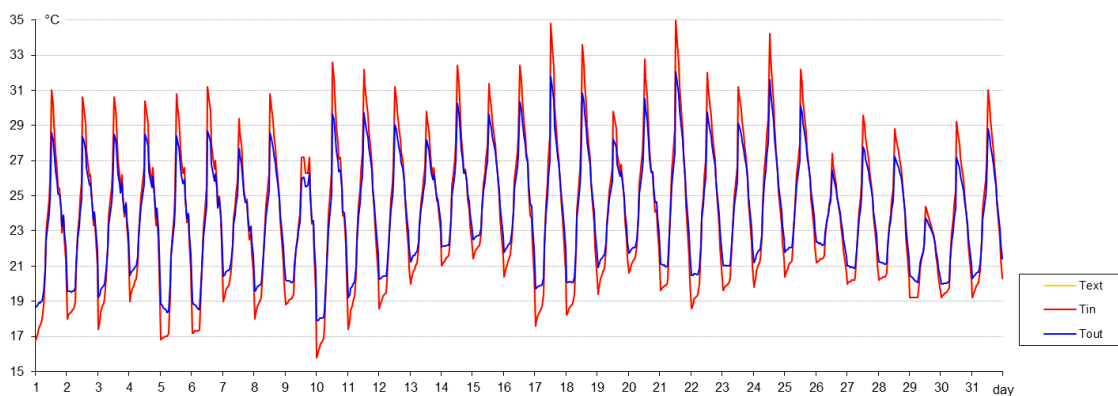


Fig. 4.4. Caso 1. Simulación anual de conductos enterrados. Temperaturas exteriores y a la salida

Fig. 4.5. Caso 1. Simulación sistema enterrado, amortiguación de la temperatura a lo largo del conducto.

Fig. 4.6. Caso 1. Simulación sistema enterrado. Temperaturas a la salida del conducto. Datos mensuales. Modelo Hollmuller.



Mediciones de la línea 1:

HORA		12:0 0	13:3 0	14:3 0	15:3 0	16:3 0
rpm		750	1110	1110	1110	750
TEMPERATURAS (°C)	exterior sol	25,0	26,0	31,3	26,2	25,5
	entrada sistema	24,3	24,3	25,6	25,4	24,3
	antes blower	24,4	24,6	24,7	24,7	24,2
	salida sistema	24,4	24,6	24,7	24,7	24,2
VELOCIDAD AIRE (m/s)	entrada sistema	5,4	2,1	1,6	2,5	1,5
	salida sistema	5,9	7,2	2,4	4,8	3,5
HUMEDAD RELATIVA %	exterior	55,0	62,0	58,0	52,0	60,0
	interior	50,0	60,0	53,0	53,0	64,0

Mediciones de la línea 2:

HORA		12:0 0	13:3 0	14:3 0	15:3 0	16:3 0
rpm		1200	850	850	850	850
TEMPERATURAS (°C)	exterior sol	25,0	26,0	31,3	26,2	25,5
	entrada sistema	24,0	25,5	26,3	24,8	24,1
	antes blower					
	salida sistema	24,4	24,1	25,2	24,7	24,5
VELOCIDAD AIRE (m/s)	entrada sistema	3,1	1,1	0,8	1,3	0,6
	salida sistema	1,9	2,0	1,2	1,2	0,3
HUMEDAD RELATIVA %	exterior	55,0	62,0	58,0	52,0	60,0
	interior	50,0	56,0	52,0	52,0	52,0

En este primer caso práctico llegamos a la conclusión de que el sistema no cumplía las condiciones requeridas, el

aprovechamiento térmico de la inercia térmica del suelo era escaso. Consideramos que los motivos serían los siguientes:

- Superficie de intercambio escasa con respecto al volumen de aire circulado, por lo que el diámetro del conducto debería ser menor.
- La distancia entre los intercambiadores era demasiado pequeña por lo que existía interferencia entre ambos.

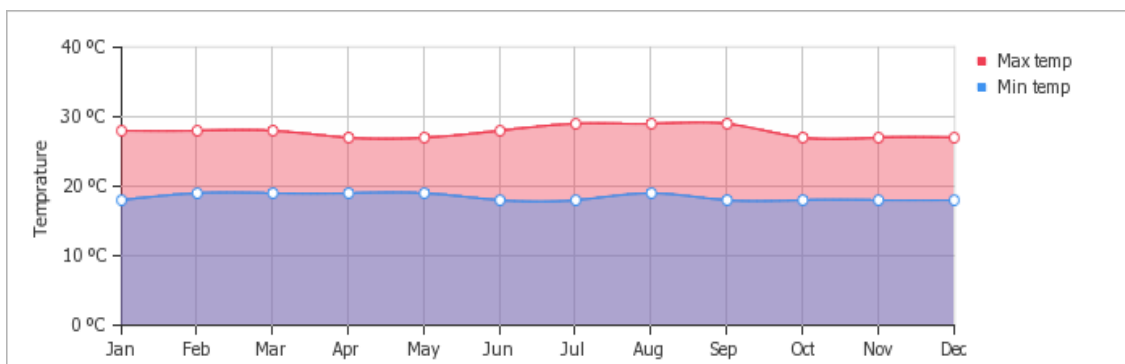
Además de la baja eficiencia del sistema la colocación de los conductos de hormigón resultaba dificultosa y era complicado conseguir una estanqueidad total por lo que, a pesar de que el hormigón resultaba interesante a efectos de conductividad térmica por su elevada inercia, en los siguientes caso prácticos se optó por materiales de mayor facilidad al montaje.

4.2 CASO PRÁCTICO 2 – Bodega en Armenia (Col)

Para este caso se nos presentó la necesidad de climatizar una bodega en la que las condiciones de humedad y temperatura del aire debían ser muy concretas debido a la necesidad de conservación de las bebidas almacenadas, la temperatura en torno al producto debía ser de $23^{\circ}\text{C} \pm 1$.

La localización del proyecto sería Armenia (Colombia) con un clima tropical medianamente cálido y húmedo.

Fig. 4.7. Armenia. Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales.



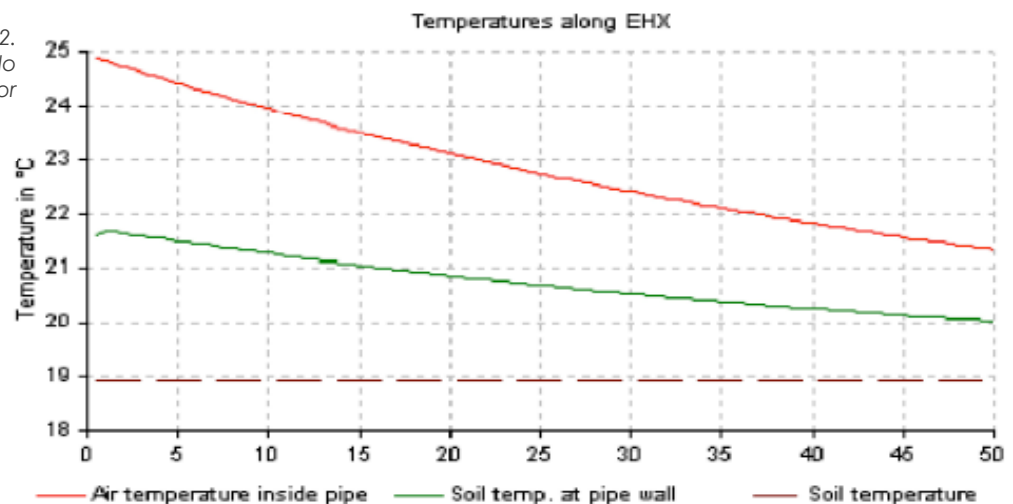
La simulación paso a paso en todas las fases de diseño nos permitió ajustar al máximo la solución tanto de sistema

enterrado como la distribución del aire en el espacio a aclimatar.

Los conductos en esta ocasión se realizaron en polipropileno de 300 milímetros de diámetro. La profundidad a la que se introdujeron fue de 1,5 metros y la distancia intereje de conductos de 0,7 metros.

Para mantener las condiciones de temperatura de 23°C necesarios necesitábamos salir del sistema enterrado con temperaturas como mínimo de 21°C. Para ello utilizamos un sistema de conductos enterrados unido a un sistema de extracción en cubierta mediante un lucernario. La circulación del aire en los conductos subterráneos se realizó mediante un grupo de presión siendo la velocidad del mismo de 6,6 m/s con

Fig. 4.8. Caso 2. Amortiguación térmica a lo largo del intercambiador enterrado.



el fin de obtener las renovaciones mínimas de aire para la disipación de calor necesaria.

Simultáneamente se realizó una simulación CFD del interior de la bodega con el fin de diseñar la impulsión y extracción de aire.

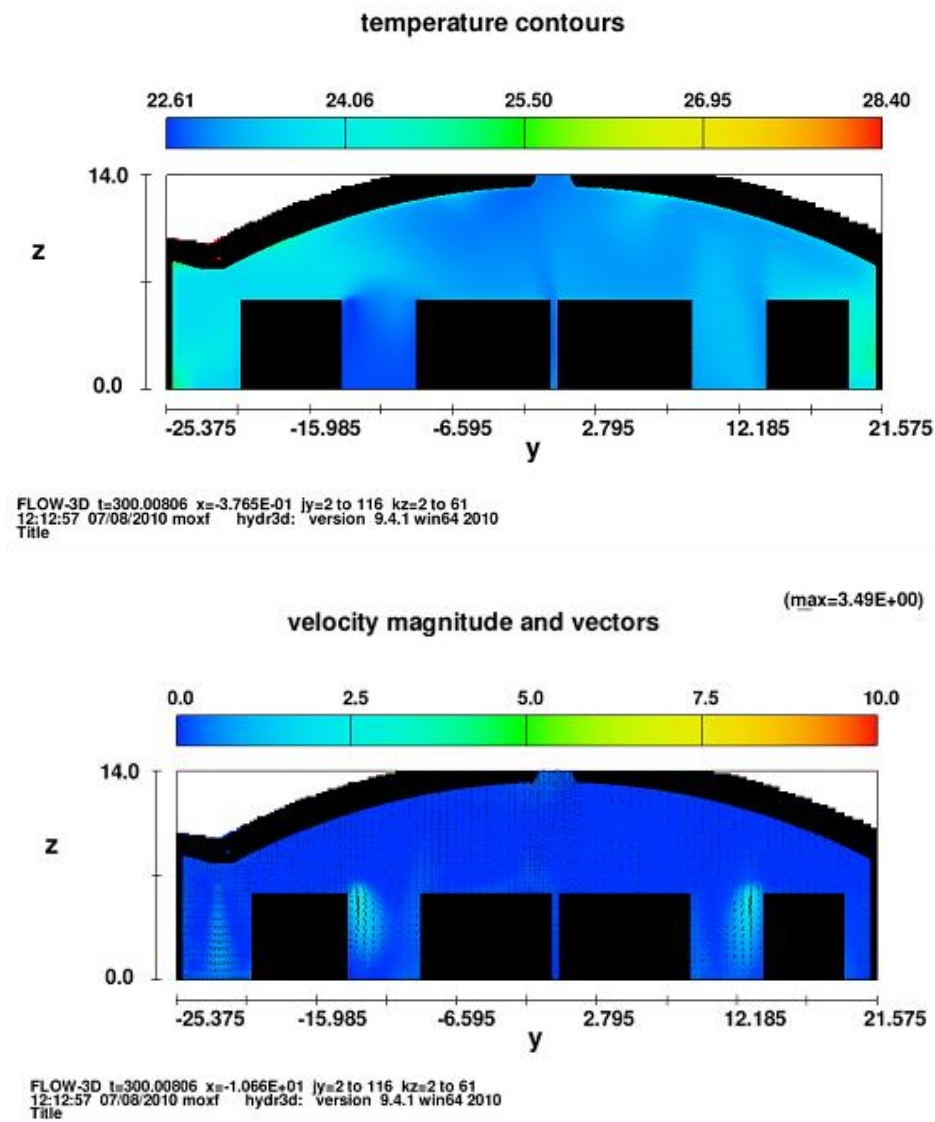


Fig. 4.9. Prototipo 2. Temperaturas en el interior de la bodega.

Fig. 4.10. Prototipo 2. Vectores de flujo de aire en el interior de la bodega.

Finalmente, una vez puesto en funcionamiento se realizaron mediciones in situ para contrastar con las simulaciones realizadas.

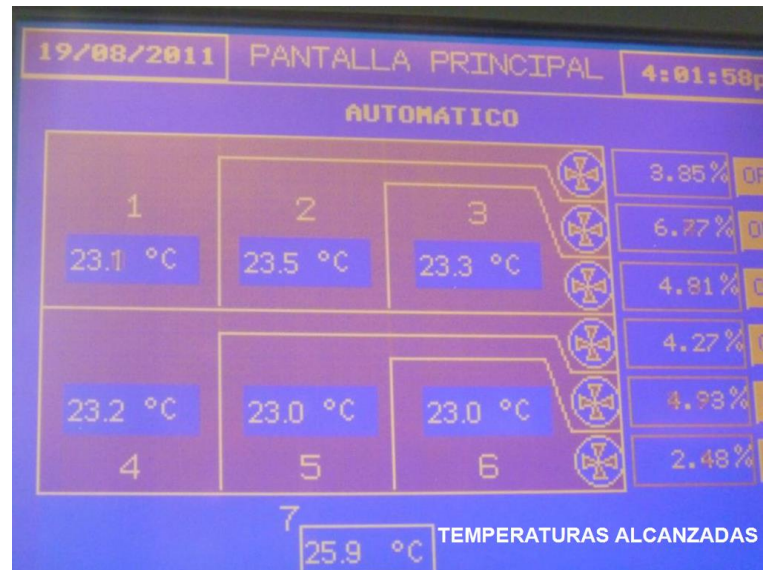


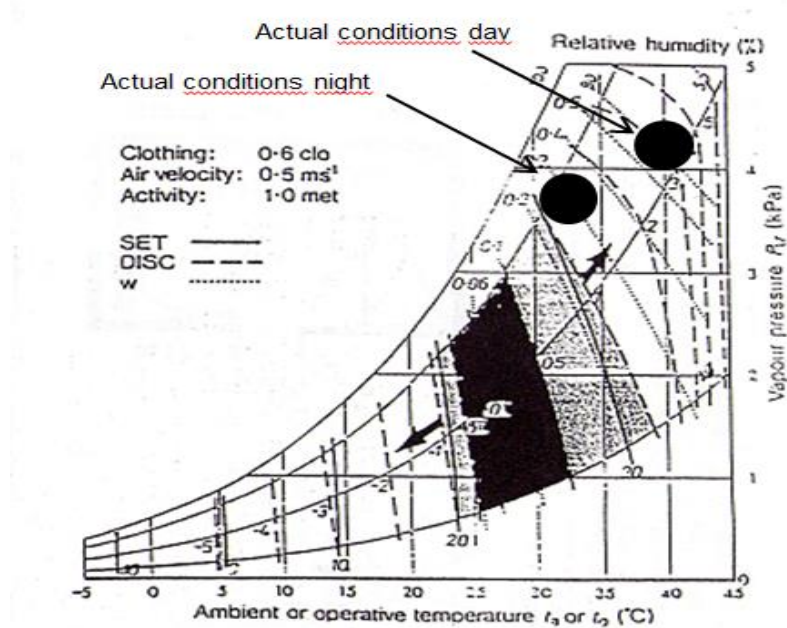
Fig. 4.11. y 4.12 Imágenes tomadas durante la monitorización

En la monitorización del edificio podemos comprobar cómo se consiguen las temperaturas exigidas mediante el sistema diseñado.

4.3 CASO PRÁCTICO 3 – Fábrica de hilos de cobre en Cali.

En este caso vamos a estudiar la posibilidad de aclimatar por ventilación natural y pretratamiento de aire por geotermia, sin necesidad de apoyo de aire acondicionado el entorno de los trabajadores de una fábrica de cables de cobre, aplicando estándares de confort adaptativo.

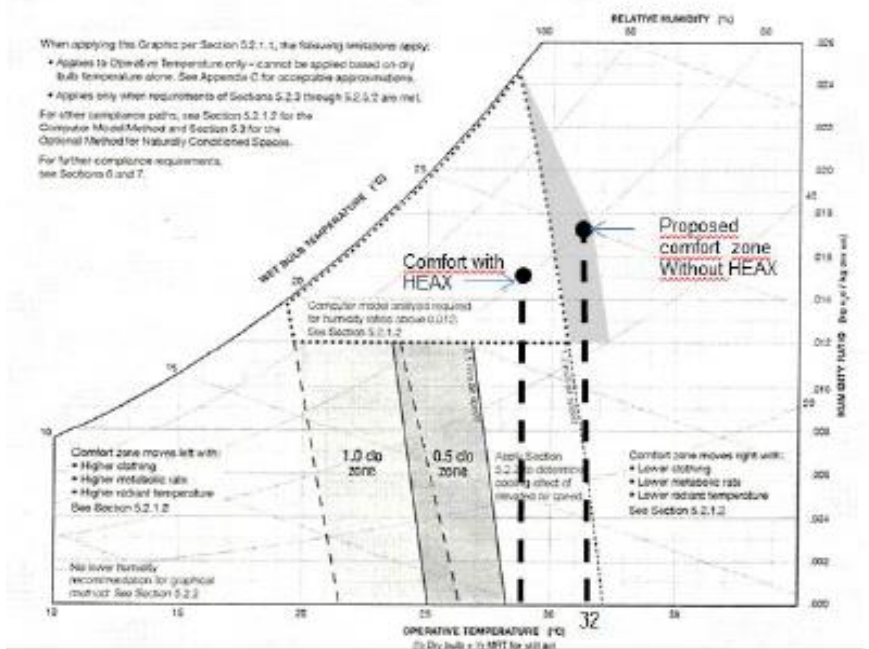
Nos encontramos en un caso de condiciones críticas para los trabajadores con temperaturas en torno a las calderas de unos 56°C y temperaturas radiantes de 40°C. Siendo las temperaturas operativas en torno a los trabajadores de 37°C. Lo que supondría un muy elevado estrés térmico de acuerdo a los estándares de confort de Markus/Morris.



Realizaremos el diseño de la solución mediante un proceso de simulación paso a paso que nos permita ajustar al máximo las soluciones con el fin de obtener los resultados deseados.

Fig. 4.13. Diagrama Markus/Morris. Condiciones previas.

Fig. 4.14. Zonas de confort propuestas sólo con ventilación natural y añadiendo intercambiadores enterrados al diseño.



En primer lugar diseñaremos el sistema de ventilación natural mediante rejillas de entrada de aire en fachada y lucernario de

extracción en cubierta y realizaremos una simulación CFD de esta primera solución adoptada.

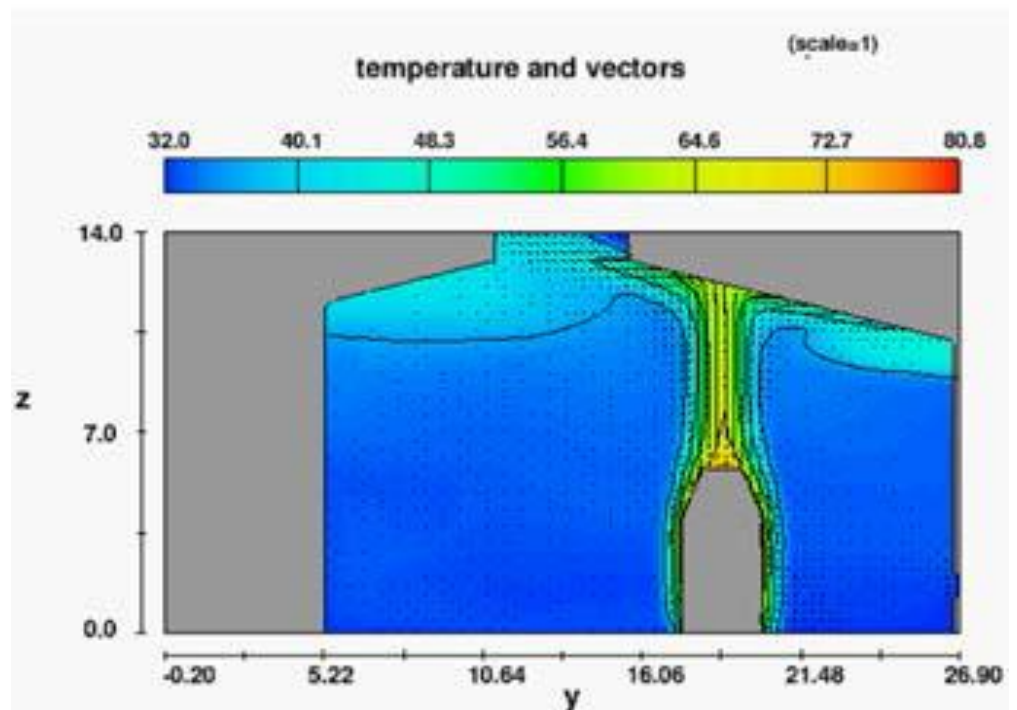
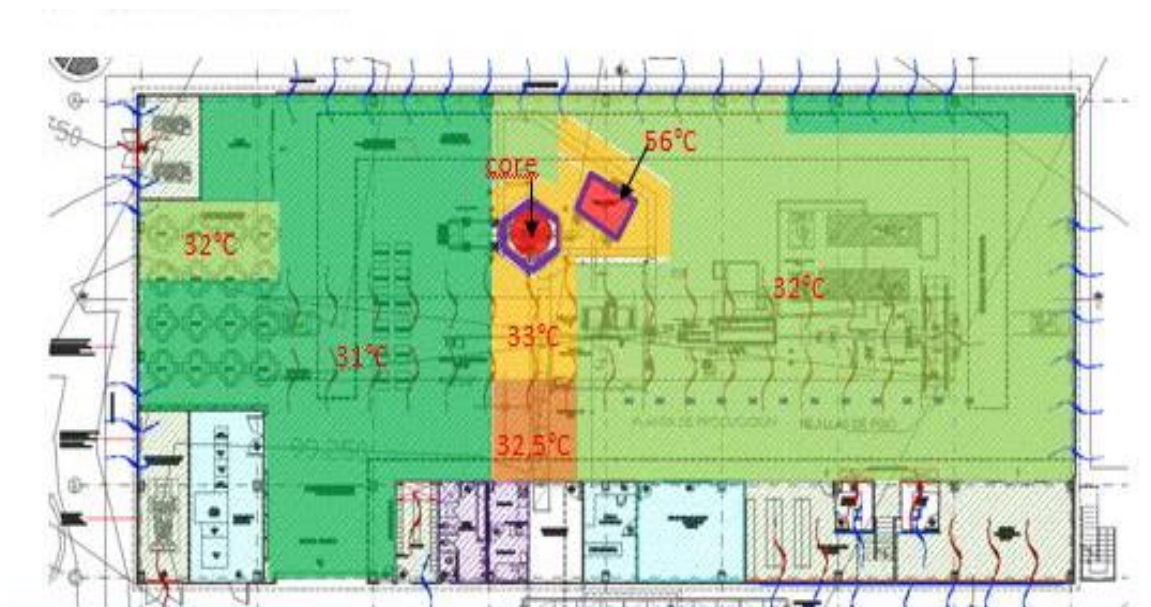
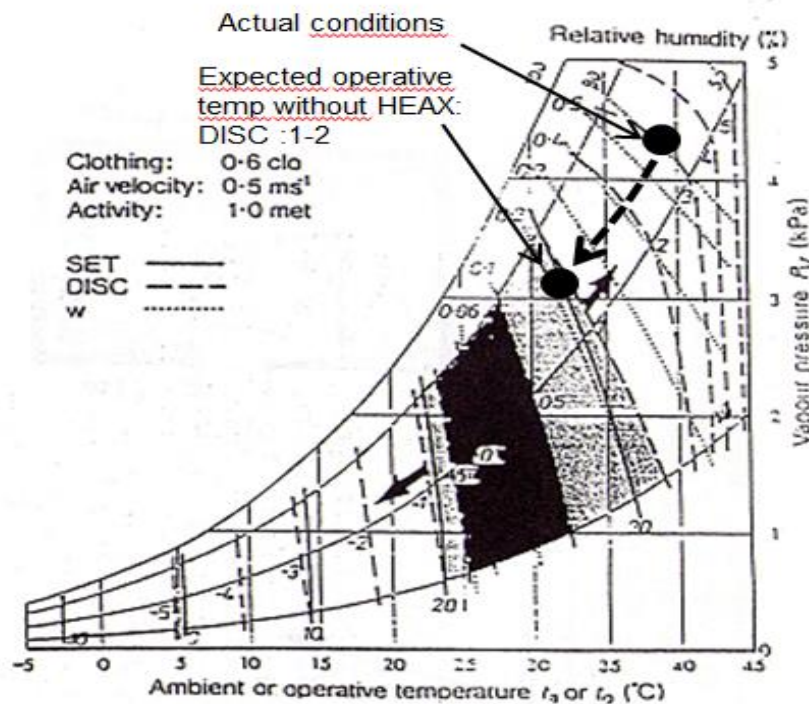


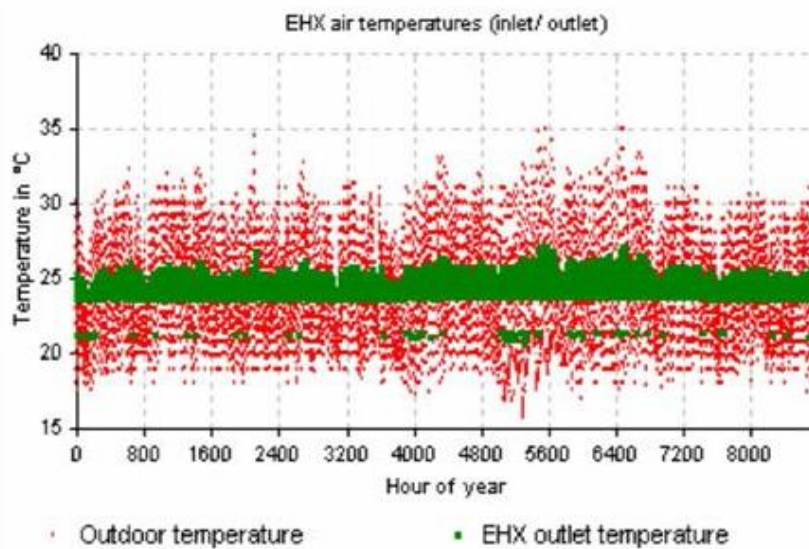
Fig. 4.15. Temperaturas en el interior del edificio solo con ventilación natural



Lo que nos situaría en un discomfort 1 según Markus/Morris



A continuación realizaremos el diseño de conductos enterrados en función de las temperaturas que necesitamos obtener.



Realizando una nueva simulación CFD con la introducción del aire pretratado.

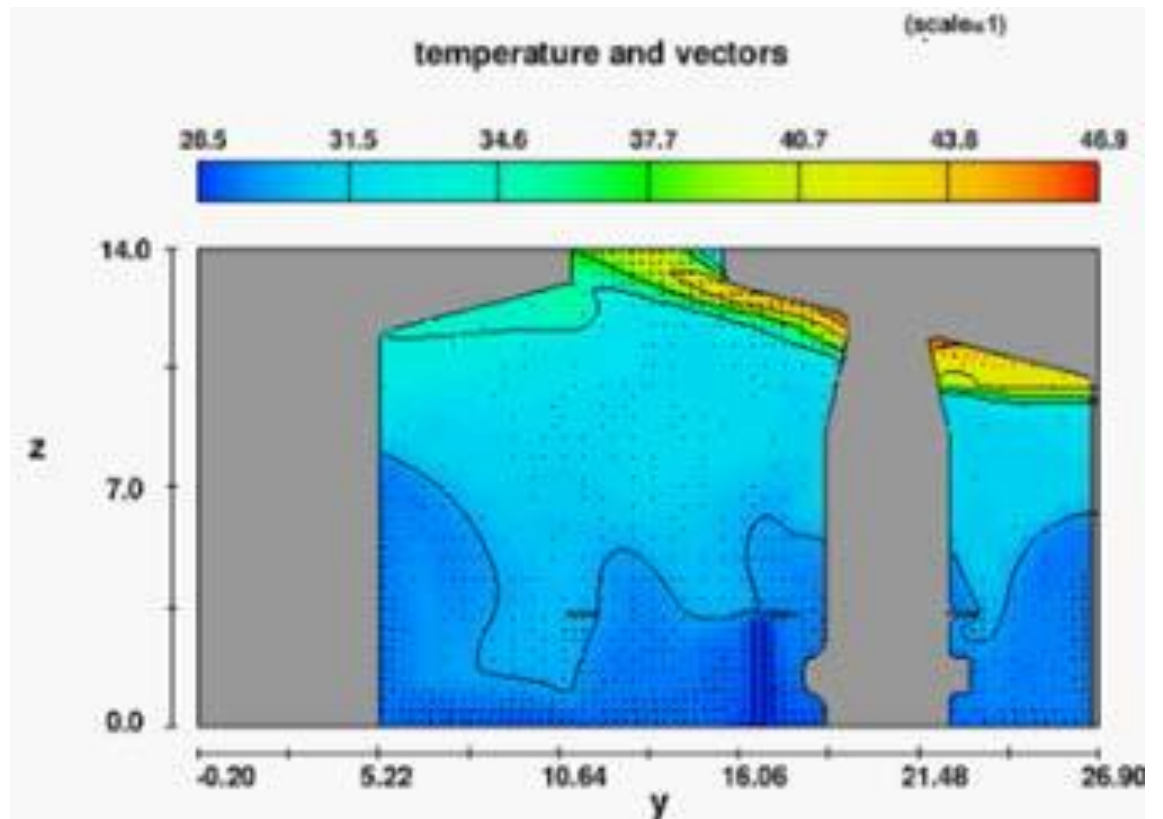
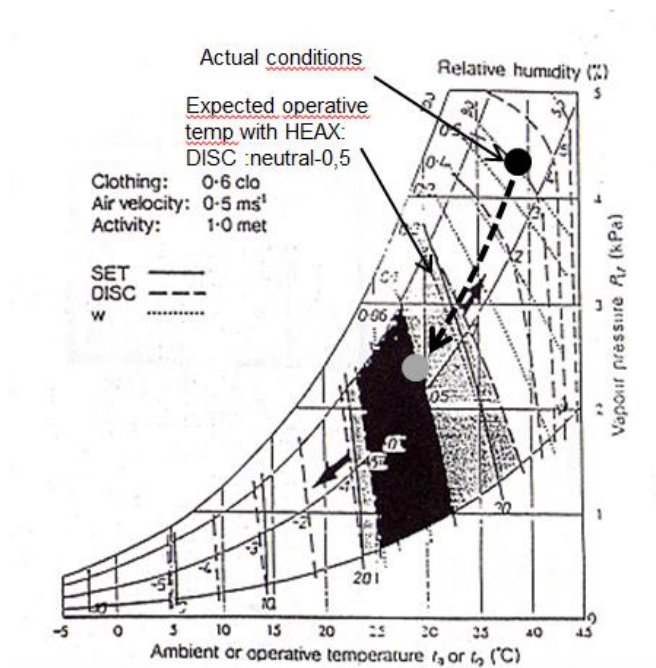


Fig. 4.16. Temperaturas en el interior del edificio con ventilación natural y pretratamiento de aire con intercambiadores enterrados.



Lo que nos situaría en el límite entre la zona de disconfort 0,5 y la zona de confort según Markus/Morris.



Una vez realizado el proyecto se realizó una monitorización del edificio operativo obteniéndose los siguientes resultados:

Sin conductos enterrados:

- Temperatura exterior: 32 °C- 35°C.
- T interior junto a la caldera : 32 °C -33 °C.
- T interior en los espacios adyacentes al entorno de la caldera :29°C – 30°C.

Con conductos enterrados:

- Temperatura en todo el recinto interior: 27°C±1

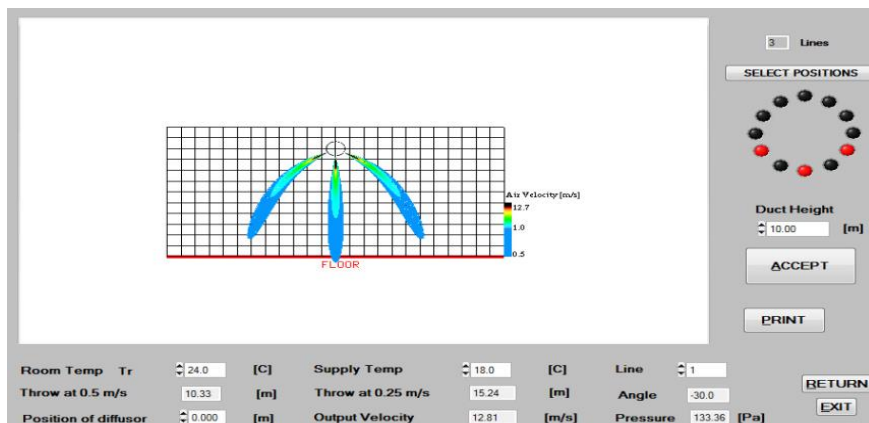
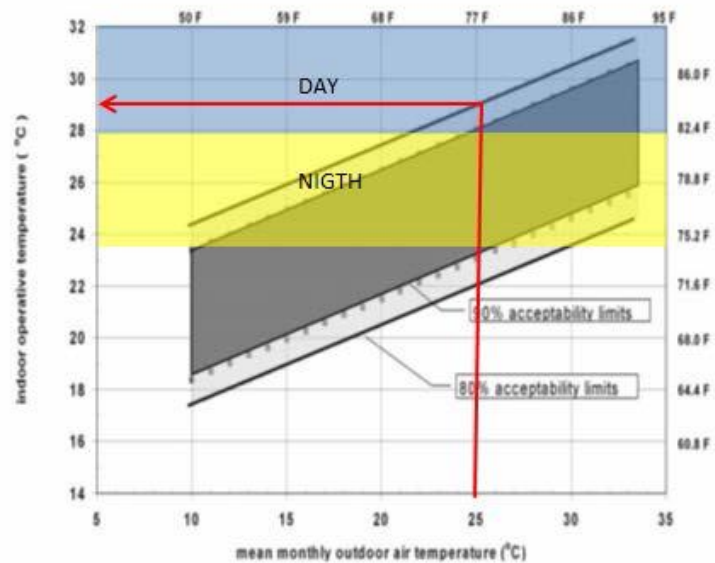


Fig. 4.17. Resultados de monitorización.

Lo que según los estándares ASHRAE 55 de confort adaptativo supondría encontrarse en el límite de un 80% de aceptación.



No obstante desde el punto de vista de la respuesta de los trabajadores, el confort aportado por el sistema de climatización era más que aceptable ya que en este caso se contemplaba una componente de estrés térmico superior aportado por las calderas y que no queda contemplado dentro de los parámetros de confort adaptativo.

5 CONCLUSIONES

En base al trabajo de campo realizado y las simulaciones y análisis, podemos plantear las siguientes tres conclusiones, atendiendo a la importancia de las mismas:

A nivel técnico y conceptual, se ha conseguido el desarrollo y la validación de una herramienta de cálculo y diseño de Intercambiadores Enterrados por Convección Natural (IECN). En este sentido, se ha contrastado su viabilidad y efectividad en las simulaciones y comparativas realizadas en las distintas villas estudiadas.

Esta herramienta ha permitido poder realizar las simulaciones lo más ajustada posible a la realidad de las soluciones bioclimáticas existentes, arrojando datos que luego se han verificado con la toma de datos in situ.

Entendemos que es posible el uso y aplicación de esta herramienta para el cálculo y modelización en fase de diseño de propuestas constructivas actuales, integrando diferentes baterías de soluciones bioclimáticas que permitan un consumo energético casi cero, así como el cumplimiento de criterios de sostenibilidad y eficiencia energética.

Esta herramienta podría complementarse con otras herramientas informáticas de simulación como las ya presentadas en este estudio de forma que el cálculo y diseño inicial se ajuste lo más posible a parámetros reales y permita al gestor o planificador asegurar unos resultados finales y de confort en edificaciones que usen de forma total o parcial sistemas de intercambiadores aire-tierra y ventilación natural, así como otras soluciones bioclimáticas como sistemas de extracción de aire, iluminación natural, etc.

Como segunda conclusión, se ha procedido a la validación de los sistemas de geotermia para clima continental. En base a la experiencia de las villas del Renacimiento Italiano y sobre el trabajo de estudio y simulación realizado, hemos podido

verificar la eficiencia de las herramientas de simulación que se han presentado en este trabajo así como la efectividad de las soluciones bioclimáticas realizadas en el Siglo XVI para conseguir de forma autónoma y nulo consumo energético unas condiciones climáticas más atenuadas en las distintas estaciones del año.

Entendemos que de este análisis de las soluciones de diseño integrado extraídas de la Arquitectura pneumática del Renacimiento es posible una extrapolación de las mismas, mejorando su eficiencia mediante herramientas de cálculo, las cuales nos han arrojado resultados muy satisfactorios en cuanto a su validez.

La modelización de cada uno de los edificios seleccionados de la Arquitectura del Renacimiento nos ha permitido un mayor conocimiento de las soluciones que aportaran Francesco Trento, Andrea Palladio y Vincenzo Scamozzi, para una posterior reformulación de las mismas aplicándolas a las problemáticas y necesidades actuales.

En este sentido podemos ofrecer con datos reales toda una serie de alternativas a la situación actual de los sistemas o soluciones de refrigeración y calefacción en la edificación en clima continental, para diversos usos edificatorios, basadas en su mayoría en aparatos de climatización industrial, grandes consumidores de energía y generadores de diversos problemas y externalidades en las distintas fases de su vida útil.

El sistema de intercambiadores aire-tierra complementado con sistemas de ventilación natural, extracción y renovación de aire, así como otras soluciones de diseño arquitectónico eficiente como pueden ser las basadas en transferencia radiante luminosa, nos permiten plantear una alternativa real para la refrigeración y calefacción de edificaciones para el clima continental.

Por último, como tercera conclusión y en base al trabajo teórico y práctico aplicado de la sección cuarta de este trabajo, ponemos en valor el interés y las expectativas de desarrollo de los sistemas de geotermia y bioclimática combinados, para ser aplicados en climas tropicales.

Los sistemas de climatización por disipación de calor mediante ventilación natural y pretratamiento pasivo de aire por geotermia de baja temperatura o superficial, supondrían una respuesta real a la problemática de la refrigeración en climas tropicales de altas temperaturas y humedades y de desfase térmico anual nulo o casi nulo.

Frente a lo que pudiera pensarse de la baja efectividad de un sistema enterrado en un clima que no presenta diferencia de temperatura entre invierno y verano, un diseño adecuado y una buena combinación de soluciones, permitiría el aprovechamiento del desfase térmico día/noche.

Entendemos que para la realización de soluciones optimizadas e integrales, en conjunto con una ventilación natural controlada dentro del edificio, se hacen necesarias herramientas de simulación en la fase de diseño arquitectónico.

En los casos prácticos presentados se ha demostrado de forma empírica que es posible conseguir una batería de soluciones bioclimáticas eficiente, a través de una metodología paso a paso.

Este trabajo de investigación arroja resultados y conclusiones de gran importancia para la práctica y revalorización del trabajo y arte de la arquitectura en los tiempos actuales.

No sólo es importante y trascendente la eficiencia energética de las edificaciones en base a soluciones técnicas aplicadas sobre la propia edificación y normalmente con un criterio expost.

Lo que aquí se plantea es que la mejor eficiencia energética es la energía no consumida, y que esto es posible gracias a una análisis y diseño de soluciones ex-ante, en conjunción con una serie de herramientas de cálculo y simulación que ofrecen datos e información que nos permiten ajustar con fiabilidad nuestros distintos escenarios para ofrecer las soluciones energéticamente más eficientes, y ecológicamente más sostenibles y duraderas.

Esperamos que este trabajo y estudio pueda servir de apoyo para seguir investigando y planteando nuevas formas de entender la arquitectura desde un plano más holístico en el cual la figura del arquitecto no es únicamente la persona que diseña, sino la que diseña en contacto y conocimiento con el medio y entorno más cercano, y la que ofrece las mejores soluciones, más accesibles y con el menor impacto posible.

6 ANEXOS

6.1 ANEXO 1.

Propiedades de los principales materiales empleados para la simulación de la envolvente de las Villas neumáticas.

ELEMENTOS	MATERIALES	VALOR U (W/m ² K)
Particiones interiores	CONSTRUCTION	1,805
Cubiertas Inclínada y cúpula	Cubierta de tejas sobre estructura de madera	2,601
Muros enterrados	Sillares de piedra caliza	1,773
Suelos en contacto con el terreno	Losas de piedra caliza	3,303
Forjados	Estructura de madera con losas de terracota	2,479
Suelos enterrados	Losas de piedra caliza	1,165
Puertas exteriores	Madera	2,251
Cerramientos	Ladrillo Estucado	1,912
Cerramientos	Sillares de piedra caliza	1,773
Puertas interiores	Madera	2,251
Forjado planta baja	Forjado	1,404

			Trans luminosa	Trans Total (SHG C)	Trans Solar directa
Ventanas	vidrio simple con marco de madera	3,835	0,821	0,768	0,741

6.2 ANEXO2. TEXTOS.

6.2.1 VIRGILIO, LA ENEIDA FRAGMENTO SOBRE EOLIA

[...] Eolia, patria de las tempestades, lugares henchidos de furiosos vendavales; allí el rey Eolo en su espaciosa cueva rige los revoltosos vientos y las sonoras tempestades, y los subyuga con cárcel y cadenas; ellos, indignados, braman, con gran murmullo del monte, alrededor de su prisión. Sentado está Eolo en su excelso alcázar, empuñado el cetro, amasando sus bríos y templando sus iras, porque si tal no hiciese, arrebatarían rápidos consigo mares y tierras y el alto firmamento, y los barrerían por los espacios; de lo cual, temeroso el Padre omnipotente, los encerró en negras cavernas, y les puso encima la mole de altos montes, y les dio un rey que, obediente a sus mandatos, supiese con recta mano tirarles y aflojarles las riendas. Dirigióse a él entonces suplicante Juno con estas razones: “¡Oh, Eolo, a quien el padre de los dioses y rey de los hombres concedió sosegar las olas y revolverlas con los vientos! Una raza enemiga mía navega por el mar Tirreno, llevando a Italia su Ilión y sus vencidos penates. Infunde vigor a los vientos y sumerge sus destrozadas naves, o dispérsala y esparce sus cuerpos por el mar. Tengo catorce hermosísimas ninfas, de las cuales te daré en estable himeneo y te destinaré para esposa a la más gallarda de todas, Deyopea, a fin de que, en recompensa de tales favores, more perpetuamente contigo y te haga padre de hermosa prole.

Eolo respondió: “A ti corresponde ¡oh Reina! Ver lo que desees; a mi tan sólo obedecer tus mandatos. Por ti me es dado este mi reino, tal cual es; por ti el cetro y el favor de Jove; tú me otorgas sentarme a la mesa de los dioses y me haces árbitro de las lluvias y de las tempestades.

Apenas hubo pronunciado estas palabras, empujó a un lado con la punta de su cetro un hueco monte, y los vientos, como en escuadrón cerrado, se precipitan por la puerta que les ofrece, y levantan con sus remolinos nubes de polvo

Cerraron de tropel con el mar, y lo revolvieron hasta sus más hondos abismos el Euro, el Noto y el Abrego, preñado de tempestades, arrastrando a las costas enormes oleadas. Siguiese a esto el clamoreo de los hombres y el rechinar de las jarcias. De pronto las nubes roban el cielo y la luz a la vista de los Teucros; negra noche cubre el mar. Truenan los polos y resplandece el éter con frecuentes relámpagos; todo amenaza a los navegantes con una muerte segura. Afloja entonces de repente el frío los miembros de Eneas; gime, y tendiendo a los astros ambas palmas, prorrumpe en estos clamores: “¡Oh, tres y cuatro veces venturosos, aquellos a quienes cupo en suerte morir a la vista de sus padres bajo las altas murallas de Troya! ¡Oh, hijo de Tideo, el más fuerte del linaje de los Dánaos! ¿No me valiera más haber sucumbido en los campos de Ilión, y entregado esta alma al golpe de tu diestra, allí donde Héctor yace traspasado por la lanza de Aquiles, donde yace también el corpulento Sarpedonte, donde arrastra el Simois bajo sus ondas tantos escudos arrebatados y tantos yelmos y tantos fuertes cuerpos de guerreros?

Mientras así exclamaba, la tempestad, rechinante con el vendaval, embiste la vela y levanta las olas hasta el firmamento

Pártense los remos, vuélvese con esto la proa y ofrece el costado al empuje de las olas; un escarpado monte de agua se desploma de pronto sobre el bajel. Unos quedan suspendidos en la cima de las olas, que, abriéndose, les

descubren el fondo del mar, cuyas arenas arden en furioso remolino. [...]

6.2.2 VITRUVIO LIBRO PRIMERO, CAPITULO 4. LA SALUBRIDAD DE LOS ELEMENTOS

He aquí los principios fundamentales en la construcción de las murallas. En primer lugar, se seleccionará un terreno totalmente favorable: un terreno elevado y abierto, despejado de nieblas y con una orientación que no sea ni calurosa ni fría, sino templada; se evitará, además, la proximidad a terrenos pantanosos, pues al amanecer, cuando las brisas matutinas llegan a la ciudad, esparcen el olor de las bestias que viven junto a los pantanos —un olor nauseabundo— entremezclado con la niebla que llega hasta los mismos habitantes, quienes, al inhalarlo con su aliento, sufren las consecuencias que ocasiona un terreno insalubre y pestilente. De igual modo, tampoco será salubre la ubicación de las murallas junto al mar, orientadas hacia el mediodía o hacia el occidente, pues cuando lleguen los calores del verano, al amanecer el calor es fuerte y al mediodía abrasará; de igual modo, si su orientación es hacia el occidente, al amanecer el Sol calienta ligeramente, al mediodía agobia y al atardecer será ardiente. En consecuencia, por tales cambios de temperatura, de calor y de frío, los seres animados que habitan en estos lugares acaban alterándose. También es válido incluso para las cosas inanimadas. Efectivamente, nadie debe orientar hacia el sur ni hacia el poniente, sino hacia el norte las bodegas de vino cubiertas, pues esta orientación mantiene siempre una temperatura constante e invariable. Lo mismo sucede con los graneros que, orientados hacia el curso del Sol, rápidamente alteran las buenas condiciones de las vituallas y de los frutos, que, al no estar colocados en una exacta orientación, sino opuestas al curso del Sol, no se conservan durante largo

tiempo. Así es, cuando el calor abrasa, con sus radiaciones elimina la consistencia de las sustancias, con sus cálidos vapores va absorbiendo sus propiedades naturales, y, por efecto del calor, las debilita y las atrofia. Fenómeno que también advertimos en el hierro, pues, aunque es un mineral duro por naturaleza, cuando en las fraguas se pone al rojo vivo, por efecto del fuego se hace moldeable, de manera que se puede forjar con facilidad cualquier forma. Si estando al rojo vivo y siendo moldeable, se enfría templándolo con agua fría, de nuevo se vuelve duro y adquiere sus propiedades naturales.

Podemos pensar en la autenticidad de tales fenómenos, debido a que en el estío todos los cuerpos se debilitan por el calor, tanto estén en lugares pestilentes como en lugares saludables; e incluso durante el invierno, las zonas que son pestilentes se vuelven saludables ya que se hacen más consistentes, como consecuencia del frío.

Exactamente igual sucede cuando las personas se trasladan desde regiones frías hacia regiones cálidas: no pueden mantenerse inalterables, sino que se debilitan. Por el contrario, los que desde regiones cálidas se trasladan a zonas frías del norte, no sólo no enferman con el cambio de lugar, sino que se robustecen. Por todo ello, debe ponerse sumo cuidado en la ubicación de las murallas, alejándolas de aquellas zonas que puedan esparcir aires cálidos hacia sus habitantes. De acuerdo con los principios o elementos primarios, en griego *stoichea*, todos los cuerpos se componen de fuego, agua, tierra y aire que, al mezclarse entre sí según su temperatura natural, conforman las propiedades de todos los seres animados, hablando en términos generales.

Por tanto, cuando el calor sobrepasa los límites naturales destruye y disuelve con su ardor los otros elementos

naturales; tales anomalías son también una consecuencia de un clima férvido, en algunas partes concretas: el calor afecta a las venas superficiales con más intensidad de la que puede soportar el cuerpo, de acuerdo a su temperatura natural, según la mezcla que lo compone.

Si el agua llena las venas del cuerpo y logra que sean desiguales los otros tres principios, éstos se desvirtúan, corrompidos por el elemento líquido y, en consecuencia, se anulan las cualidades que poseían debido a su composición o mixtura. Los mismos efectos ocasiona el enfriamiento de las brisas y del agua, que provoca alteraciones en el cuerpo. De igual modo, si se aumenta o disminuye la composición natural del elemento tierra o del elemento aire, se consigue un debilitamiento de los otros elementos básicos: los terrenos, con copiosas y excesivas comidas y los aéreos con un clima excesivamente duro.

Si se quisiera observar todo esto sensorialmente y de un modo preciso, basta constatarlo y prestar atención a la naturaleza de las aves, peces y animales de tierra; así, se percibirá la diferencia de temperatura y de composición. Las aves poseen una determinada mixtura, otra los peces y otra muy distinta los animales de tierra. Los animales alados poseen menos elementos de tierra y de agua, un moderado calor, pero mucha cantidad de aire y, en consecuencia, al estar compuestos de elementos ligeros se elevan en el aire con toda facilidad. Por otra parte, los peces poseen una temperatura templada con gran cantidad de elemento aire y tierra y muy poco de elemento agua y, precisamente porque tienen poco elemento líquido, con toda facilidad subsisten en el agua y cuando son sacados a tierra mueren, justo al abandonar el agua.

Por la misma razón, los animales terrestres poseen menor cantidad de tierra y muchísima de agua, ya que tienen una temperatura templada por el aire y el calor; precisamente porque en ellos abundan las partes húmedas, es imposible que pervivan dentro del agua durante largo tiempo.

En conclusión, si las cosas son realmente como las hemos expresado, si percibimos que los cuerpos de los animales están compuestos de tales principios o elementos y si pensamos que éstos se debilitan y mueren debido a un exceso o a una deficiencia de elementos, no tenemos la más mínima duda de que es muy conveniente buscar con todo interés la ubicación de las murallas, con el fin de elegir zonas más templadas, puesto que lo que perseguimos es la salubridad en la disposición de las murallas. En mi opinión, se debe volver insistentemente a la teoría de los autores antiguos. En efecto, éstos al inmolar animales que habían estado pastando en parajes donde se levantaban fortalezas o campamentos fijos, examinaban sus hígados y si los encontraban amoratados y enfermos, inmolaban otros animales ante la duda de si estaban enfermos por alguna indisposición, o bien por tomar pastos en mal estado. Como eran muy expertos, cuando veían que los hígados estaban sanos, por alimentarse de agua y de pastos, precisamente en ese lugar levantaban sus fortificaciones. Si hallaban los hígados enfermos, por lógica trasladaban tal situación a los humanos, en el sentido de que en esos mismos parajes con el tiempo se iba a producir abundancia de agua insalubre y de alimentos nocivos y, así, se iban a vivir a otro sitio, buscando ante todo la salubridad.

Podemos concluir que si la tierra es saludable para el pasto y el alimento, sus propiedades son también salubres, como vemos en las tierras de la ciudad de Creta, cerca del río

Potero, que fluye entre las ciudades de Cnosos y Gortina. A derecha y a izquierda del río pacen los rebaños. Pero los que pacen cerca de Cnosos padecen esplenitis y los que pacen al otro lado, cerca de Gortina, no sufren tal enfermedad del bazo. Por esta circunstancia, los médicos buscaban el porqué de tal enfermedad y descubrieron en estos pastos una clase de hierba que, al rumiarla los rebaños, disminuía su bazo. Recogiendo precisamente esta hierba, sanan a los enfermos de bazo con este medicamento, que los cretenses denominan asplenon. Por ello, podemos conocer que las propiedades de los lugares son naturalmente insalubres o, por el contrario, salubres debido a sus pastos y a su agua. Si se van a levantar unas murallas en terrenos pantanosos, situados junto al mar y orientados hacia el septentrión, o bien entre el septentrión y el oriente, y si tales pantanos estuvieran en lugares más altos que el litoral del mar, entonces con toda tranquilidad se podrán construir las murallas. Se cavarán unos canales que verterán el agua en el litoral y, al subir el nivel del mar por causa de las mareas, se llenarán las lagunas con sus movimientos marítimos. Y se mezclarán sus aguas, lo que imposibilitará que nazcan animales lacustres y los que alcancen el cercano litoral nadando, al no estar acostumbrados al salitre, perecerán. Un ejemplo de lo que estamos tratando pueden ser las lagunas Gálicas, que están próximas a Altino, Rávena, Aquilea y otros municipios que, al estar muy próximos a estas lagunas, gozan de una extraordinaria salubridad. En otros lugares encontramos lagunas que no desaguan ni por medio de ríos ni por canales, como la laguna Pontina, cuyas aguas se corrompen exhalando unos vapores densos y pestilentes.

En Apulia, una antigua fortaleza llamada Salpis, fundada por Diomedes a su regreso de Troya, o bien, como relatan algunos escritores, fundada por Elfias de Rodas, había sido

construida en estos parajes pantanosos, por lo que sus habitantes, al caer gravemente enfermos cada año, se acercaron a M. Hostilio y con suplicas consiguieron que les buscara y les eligiera una ubicación adecuada para trasladar allí su fortaleza. M. Hostilio, apoyándose en argumentos de peso, adquirió unas tierras junto al mar, en un lugar salubre, y pidió al Senado y al pueblo romano que le permitieran trasladar la fortaleza: levantó las murallas, parceló su superficie y por un sestercio vendió a cada habitante un solar para su casa. Realizadas estas gestiones, abrió un paso desde el lago hacia el mar y llevó a cabo la construcción de un puerto en el mismo lago para el municipio. Actualmente los habitantes de Salpis, alejados apenas cuatro mil pasos de su antigua fortaleza, habitan en un lugar salubre.

7 ÍNDICE DE FIGURAS

Tablas

Tabla 2.1. Parámetros de predimensionado de intercambiadores tierra/ aire.	39
Tabla 3.1 Datos tomados durante el día 14 de Agosto del 2012 en Grotta Carli.	78
Tabla 3.2 Datos tomados durante el día 28 de Noviembre de 2013 en Grotta Carli.	79
Tabla 3.3. Datos recogidos en el Covoletto da Schio el 18 de Agosto de 2012 a las 12 y a las 18 h. Temperatura y velocidad del aire.	81
Tabla 3.4. Datos recogidos en la Grotta Marinali el 18 de Agosto de 2012 a las 17 h. Temperatura y velocidad del aire.	82
Tabla 3.5. Mediciones realizadas en Villa Eolia en Agosto de 2012	132

Figuras

Fig. 1.1. Pintura de Renzo Kita	11
Fig. 1.2. Acuarela de Villa Eolia. David Mayernik	12
Fig. 1.3. Conductividad térmica de suelos en función de su contenido en agua (Musy y Soutter, 1991)	16
Fig. 1.4. Comparación entre las tasas de flujos de los dos temas. Fuente: GHIAUS et al, 2005	18
Fig. 1.5. Efecto de las presiones del viento sobre los edificios	19
Fig. 1.6. Esquemas de la ventilación de mezclado y por desplazamiento. Fuente Thomas et al. 2006	20
Fig. 2.1. Temperaturas en función de la Profundidad del terreno. Datos tomados en Nantes (Francia)	28
Fig. 2.2. Esquema de principio para el cálculo analítico del intercambio difusivo aire/tierra. Cortes transversal y longitudinal.	36
Fig. 2.3. Radios de difusión en base a las amortizaciones diarias y anuales. Posibilidades de diseño.	38
Fig. 3.1. Piscinas de Nerón en Baie	51
Fig. 3.2. Inscripción sobre la fachada de Villa Eolia en la que se menciona la estancia de Galileo Galilei en la Villa.	54
Fig. 3.3. Texto de Palladio referido a las Villas de Costozza.	54

Fig. 3.4	Vicenza. Temperatura Exterior Seca anual. Datos horarios.....	55
Fig. 3.5	Humedades relativas anuales en Vicenza, datos horarios.....	55
Fig. 3.6.	Rosa de vientos predominantes de la región de Vicenza.	56
Fig. 3.7	Temperatura del suelo a un metro de profundidad a lo largo del año. Datos horarios.	56
Fig. 3.8.	Temperatura del suelo a dos metros de profundidad a lo largo del año. Datos horarios.	56
Fig. 3.9.	Temperatura del suelo a cuatro metros de profundidad a lo largo del año. Datos horarios.....	56
Fig. 3.10.	Grabado del siglo XIX en el que se representan unos turistas contratando una visita guiada al "Cóvolo" mientras tres hombres preparan la paja para las antorchas. Fuente: E. Gleria.....	65
Fig. 3.11.	Vista de uno de los accesos a la parte superior del cóvolo.....	66
Fig. 3.12.	Interior de la Gruta.	67
Figs. 3.13 y 3.14	Vistas de distintos accesos al Covolo. Fuente: Claudio Gioseffi.	68
Fig. 3.15	Planimetría general de la zona de Costozza, se han resaltado los Covoli de Costozza, el Covolo dei Venti, el Covolo Marinali, la grotta della Cantina da Schio y los Ventidotti. Reelaboración de un mapa propiedad del Conde A. da Schio al que se le superponen mediciones elaboradas por el Club de Espeleología Proteo. P.Verico.....	68
Fig. 3.16	Planimetría del Covolo Carli y de los Ventidotti.	70
Figs. 3.17, 3.18, 3.19. 3.20, 3.21 y 3.22.	Interior de los ventidotti AyB.....	73
Fig. 3.23.	Plano de situación de Villas, Cóvolos y Ventidotti.	75
Figs. 3.24., 3.25., y 3.26.	Secciones longitudinales y transversales de los Ventidotti.	75
Figs. 3.27., 3.28., y 3.29.	Secciones longitudinales y transversales del Covoletto.	77
Fig. 3.30.	Esquema de funcionamiento del Cóvolo.	77
Figs. 3.31., 3.32., y 3.33.	Imágenes de la toma de datos en Grotta Carli.	77
Fig. 3.34.	Comparativa de temperaturas exteriores y las medidas en las secciones 1 y 2 de Grotta Carli en período estival.....	79
Fig. 3.35.	Velocidad del aire y dirección del mismo a la salida de la Grotta en período estival.	79

Fig. 3.36. Comparativa de temperaturas exteriores y las medidas en las secciones 1 y 2 de Grotta Carli en período invernal.....	80
Fig. 3.37. Velocidad del aire y dirección del mismo a la salida de la Grotta en período invernal.	80
Figs. 3.38.,y 3.39 Toma de datos a la Salida del Covoletto da Schio.....	81
Figs. 3.40. Salidas de aire de la Grotta Marinali en el interior del Villino Garzadori.	81
Figs. 3.42.y 3.43. Resultados de la simulación. Velocidad del aire en el ventidotto A con resultados horarios. Gráficas anual y mensual.	84
Fig. 3.44. Datos obtenidas tras la modelización del ventidotto A. Velocidad del aire con resultados horarios. Gráfica para el mes de Agosto.....	85
Fig. 3.45. Datos obtenidas tras la modelización del ventidotto A. Temperatura del aire exterior y a la salida del mismo con resultados horarios. Gráfica anual.	85
Fig. 3.46. Datos obtenidas tras la modelización del ventidotto A. Temperatura del aire exterior y a la salida del mismo con resultados horarios. Gráfica para el mes de Agosto.	86
Fig. 3.47. Datos obtenidas tras la modelización del ventidotto A. Temperatura del aire exterior y a la salida del mismo con resultados horarios. Gráfica para el día 5 de Agosto.....	86
Fig. 3.48. Velocidad del aire obtenidas tras la modelización del ventidotto B1.	87
Fig. 3.49 y 3.50 Gráficas de temperaturas obtenidas tras la modelización de los ventidotti B1 y B2.	88
Fig. 3.51. Gráfica obtenida tras la modelización del Covoletto.	88
Figs. 3.52, 3.53., y 3.54. Vistas exteriores de Villa Morlini Trento.	92
Fig. 3.55. Plano de situación.....	94
Fig. 3.56. Alzados.	94
Fig. 3.57. Sección de la villa con el ventidotto B.	94
Fig. 3.58. y 3.59 Condición de contorno de ingreso: Ventidotto B.	95
Fig. 3.60. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección B. Velocidad de aire.....	96
Fig. 3.61. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección B. Temperaturas operativas.....	96

Fig. 3.62. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección C. Velocidad de aire.....	97
Fig. 3.63. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección C. Temperaturas operativas.....	97
Fig. 3.64. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección A.. Velocidad de aire.....	98
Fig. 3.65. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural activado. Sección A. Temperaturas operativas.....	98
Fig. 3.66. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Morlini Trento con el sistema de climatización natural anulado. Sección A. Temperaturas operativas.....	98
Fig. 3.67. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la primera planta de Villa Morlini Trento sin climatización natural.	100
Fig. 3.68. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la primera planta de Villa Morlini Trento con climatización natural.	100
Fig. 3.69. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la segunda planta de Villa Morlini Trento sin climatización natural.	101
Fig. 3.70. Diagrama de Fanger a partir de los resultados de la simulación en la segunda planta de Villa Morlini Trento con climatización natural.	101
Fig. 3.71. Fachada Posterior.	102
Fig. 3.72. Fachada Lateral. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.	102
Fig. 3.73. Fachada Principal.	103
Fig. 3.74. Escaleras de acceso al Covoletto.	104
Fig. 3.75. Inscripción en italiano antiguo sobre la puerta del Covoletto.....	104
Fig. 3.76. Vista interior de la Sala del Covoletto.	104
Fig. 3.77. Salón Principal de la Villa.	106
Figs. 3.78., 3.79. y 3.80 Rejillas de Ventilación en el Salón Principal.	106
Figs. 3.81 y 3.82 Detalle de los conductos verticales de ventilación insertos en los muros de la Villa. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.	108
Figs. 3.83., 3.84. y 3.85 Detalle de los conductos verticales de ventilación insertos en los muros de la Villa. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.	108

Fig. 3.86. Entrada a Grotta Carli.....	109
Fig. 3.87. Interior de Grotta Carli.....	109
Fig. 3.88. Vista de la pared del sótano de la Villa en la que se encontraba la antigua conexión con el Ventidotto B. Fuente: Arq. Luciano Mignotto.	109
Fig. 3.89. Plano de situación.....	110
Figs. 3.90., 3.91, 3.92 y 3.93 Alzados.....	110
Fig. 3.94. Esquema de funcionamiento del sistema de climatización natural de Villa Trento Carli.....	110
Fig. 3.95. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección C, Sala del Covoletto.. Velocidad de aire.	113
Fig. 3.96. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección C, Sala del Covoletto. Temperaturas operativas.	113
Fig. 3.97. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural anulado. Sección C, Sala del Covoletto. Temperaturas operativas.	113
Fig. 3.98. Gráfica de Confort de Fanger para la Sala del Covoletto sin climatización natural.....	113
Fig. 3.99. Gráfica de Confort de Fanger para la Sala del Covoletto con climatización natural.....	113
Fig. 3.100. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección B, Salón Principal.. Velocidad de aire.	114
Fig. 3.101. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección B, Salón Principal. Temperaturas operativas.	114
Fig. 3.102. Gráfica de Confort de Fanger para la Salón Principal sin climatización natural.....	115
Fig. 3.103. Gráfica de Confort de Fanger para la Salón Principal con climatización natural.....	115
Fig. 3.104. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural anulado. Sección B, Salón Principal. Temperaturas operativas.	115

Fig. 3.105. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección A, . Temperaturas operativas.....	116
Fig. 3.106. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural activado. Sección A, .. Velocidad de aire.....	116
Fig. 3.107. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Trento Carli con el sistema de climatización natural anulado. Sección A. Temperaturas operativas.....	118
Fig. 3.108. Gráfica de Confort de Fanger para las Salas laterales con climatización natural.	118
Fig. 3.109. Gráfica de Confort de Fanger para la las Salas laterales sin climatización natural.	118
Figs. 3.110. , 3.111 y 3.112., Vistas del Exterior de Villa Eolia.....	121
Figs. 3.113., 3.114., 3.115., 3.116., 3.117., 3.118.,3.119. y 3.120 Grabados con los nombres de los 8 vientos que se encuentran en la Carcel de los Vientos (o bodega de Villa Eolia)	122
Fig. 3.121. Roseta de Ventilación que une la Cárcel de los Vientos con el salón principal.	123
Fig. 3.122. Salón Principal de la Villa.	123
Fig. 3.123. Fresco representando a Eolo en el Techo del Salón Principal.	125
Figs. 3.124. y 3.125 Grabados sobre la puerta del Salón principal y de la Cárcel de los vientos	127
Fig. 3.126. Cárcel de los vientos (sótano de Villa Eolia).	127
Fig. 3.127. Plano de Situación.	129
Fig. 3.128. Alzados.	129
Fig. 3.129. Esquema de funcionamiento de Villa Eolia.	129
Fig. 3.130. Sección con Ventidotto.	129
Fig. 3.131. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Eolia con el sistema de climatización natural activado. . Velocidad de aire.	131
Fig. 3.132. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Eolia con el sistema de climatización natural activado. , . Temperaturas operativas.	131
Fig. 3.133. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Eolia con el sistema de climatización natural anulado. , . Temperaturas operativas.	131

Fig. 3.134. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa Eolia con climatización natural.....	131
Fig. 3.135. Gráfica de Confort de Fanger para la sin climatización natural.	131
Fig. 3.136. Toma de datos en Villa Eolia y comparativa con resultados de modelización. Temperaturas.	132
Fig. 3.137. Toma de datos en Villa Eolia y comparativa con resultados de modelización. Velocidad del aire.	132
Figs. 3.138, 3.139, 3.140. y 3.141., Vistas del Exterior de Villa da Schio.	136
Fig. 3.142. Roseta de ventilación en Villa da Schio.	139
Fig. 3.143. Vista del interior del Salón de Celebraciones de Villa Schio con la roseta de ventilación en el centro.	139
Fig. 3.144. Pintura Mural Representando al Dios Eolo que se encuentra en una de las paredes de la bodega conectada con el Covolo da Schio.	140
Figs. 3.145. y 3.146., Otras pinturas murales encontradas en la planta baja de la Villa	140
Fig. 3.147. Plano de situación.....	141
Fig. 3.148. Planimetría de la Villa.	141
Fig. 3.149. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Da Schiocon el sistema de climatización natural activado. Sección Longitudinal. Velocidad de aire.....	142
Fig. 3.150. Resultado de simulación CFD Vista en plantal. Velocidad de aire	142
Fig. 3.151. Resultado de simulación CFD con el sistema de climatización natural activado. Sección Longitudinal.Temperaturas operativas.	143
Fig. 3.152. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Da Schio con el sistema de climatización natural anulado. Sección Longitudinal,. Temperaturas operativas.....	143
Fig. 3.153. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa da Schio en el Salón de Celebraciones. sin climatización natural.	144
Fig. 3.154. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa da Schio en el Salón de Celebraciones con climatización natural.....	144
Figs. 3.155., y 3.156 Vistas exteriores de la Villa.....	146
Fig. 3.157. Cantina da Schio.	146
Fig. 3.158. Vista del exterior del Villino Garzador.....	147
Fig. 3.159. Vista del interior del Villino Garzador.....	147

Fig. 3.160. Vista del interior del Villino. Destaca el interior excavado en la roca decorada también por frescos representando a dioses del viento. La pared del fondo se encuentra decorada por unos nichos que albergan estatuas de Diana, Mercurio y Apolo realizadas por el escultor Orazio Marinali.....	148
Fig. 3.161. Detalle de los nichos con estatuas de Diana y Apolo.	149
Fig. 3.162. Detalle de una de las tres rejillas de ingreso de aire desde la Grotta Marinali con frescos representando deidades del viento.	149
Fig. 3.163. Plano de Situación.	150
Figs. 3.164. y 3.165., Alzado y Planta baja.	150
Fig. 3.166. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villino Garzadori con el sistema de climatización natural activado. Sección A.. Velocidad de aire.....	151
Fig. 3.167. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villino Garzadori con el sistema de climatización natural activado. Sección A. Temperaturas operativas.....	151
Fig. 3.168. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villino Garzadori con el sistema de climatización natural anulado. Sección A. Temperaturas operativas.....	152
Fig. 3.169. Gráfica de Confort de Fanger para la Villino Garzadori sin climatización natural.	152
Fig. 3.170. Gráfica de Confort de Fanger para la Villino Garzadori con climatización natural.	152
Figs. 3.171. y 3.172. Vistas exteriores de Villa Capra.	154
Fig. 3.173. Interior del Salón Principal de la Villa.....	156
Fig. 3.174. Vista de la Cúpula con la linterna en la parte superior.	156
Fig. 3.175. Rejilla de ventilación en el centro de la Villa representando imagen de fauno.	158
Fig. 3.176. Interior del Criptopórtico.....	158
Fig. 3.177. Plano de situación.....	159
Fig. 3.178. Planimetría y esquemas de funcionamiento.	159
Fig. 3.179. Gráficas de Temperaturas Exteriores y en el interior de la Rotonda. Datos obtenidos de la simulación mediante EnergyPlus para cúpula.....	161
Fig. 3.180. Gráficas de Temperaturas Exteriores y en el interior de la Rotonda. Datos obtenidos de la simulación mediante EnergyPlus para Sala.....	161

Fig. 3.181. Gráficas de Temperaturas Exteriores y en el interior de la Rotonda. Datos obtenidos de la simulación mediante EnergyPlus para Criptopórtico.	161
Fig. 3.182. Planta superpuesta a rosa de vientos predominantes en la región.	161
Fig. 3.183. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h. Vista en planta. Velocidad de aire.....	161
Fig. 3.184. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de La Rotonda con el sistema de climatización natural activado. Sección Longitudinal. Velocidad de aire.	163
Fig. 3.185. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de La Rotonda con el sistema de climatización natural activado. Sección Longitudinal.Temperaturas operativas.	163
Fig. 3.186. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de La Rotonda con el sistema de climatización natural anulado. Sección Longitudinal,. Temperaturas operativas.	163
Fig. 3.187. Gráfica de Confort de Fanger para la La Rotonda sin climatización natural.	163
Fig. 3.188. Gráfica de Confort de Fanger para la La Rotonda con climatización natural.	163
Figs. 3.189. y 3.190., Vistas del Exterior de la Villa Rocca Pisana.	164
Fig. 3.191. Foto aérea del conjunto en la que se puede apreciar la entrada de aire al Ventidotto.	166
Fig. 3.192. Vista del interior del criptopórtico.	166
Fig. 3.193. Detalle de Roseta de Ventilación principal vista desde abajo.....	166
Fig. 3.194. Vista del interior de la sala central en la que se aprecian la rosetta de ventilación y el óculo en cubierta.....	168
Fig. 3.195. Roseta de ventilación principal vista desde arriba.	168
Fig. 3.196. Roseta de ventilación secundaria que conecta la planta del criptopórtico con el sótano.	168
Fig. 3.197. Detalle de la entrada al ventidotto tapada en la actualidad.,...	168
Fig. 3.198. Plano de situación.....	170
Fig. 3.199. Planimetría de la Villa Rocca Pisana.	170
Fig. 3.200. Esquema de funcionamiento del sistema de climatización.....	171

Fig. 3.201. Temperaturas anuales exteriores y a la salida del ventidotto de la Rocca Pisana. Resultados de simulación con herramienta de IECN.....	171
Fig. 3.202. Temperaturas durante el mes de Agosto exteriores y a la salida del ventidotto Resultados de simulación.	171
Figs. 3.203., 3.204 y 3.205., Resultados de simulación mediante herramienta de simulación de IECN. Gráficas de temperaturas exterior y a la salida del sistema, velocidad del aire a la salida y caudal de aire introducido en la Villa. Datos para el 5 de Agosto.....	172
Figs. 3.206., 3.207, 3.208 y 3.209., Graficas de Temperaturas exteriores e interiores en la Villa Rocca Pisana. Simulación realizada con motor de cálculo de Energy Plus. Resultados obtenidos para el 5 de Agosto en:	173
Fig. 3.210. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección con Ventidottol. Velocidad de aire.....	174
Fig. 3.211. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección con Ventidottol. Temperaturas operativas.	174
Fig. 3.212. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección central. Velocidad de aire.....	175
Fig. 3.213. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural activado. Sección con central. Temperaturas operativas.....	176
Fig. 3.214. Resultado de simulación CFD para 5 de Agosto a las 16h de Villa Rocca Pisana con el sistema de climatización natural anulado. Sección central. Temperaturas operativas.....	177
Fig. 3.215. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa Rocca Pisana sin climatización natural.	178
Fig. 3.216. Gráfica de Confort de Fanger para la Villa da Schio con climatización natural.	178
Fig. 3.217. Mediciones realizadas en la villa Rocca Pisana el 14 de Agosto de 2012, comparativa con modelización.....	180
Fig. 3.218. Planimetría de la Villa Rocca Pisana según Vincenzo Scamozzi.....	181
Figs. 3.219. y 3.220. Villa Dolo Fachada y Planimetría. En esta villa junto con la Villa Bardellini Scamozzi reproduce un sistema similar de climatización natural al de la Rocca Pisana. En el jardín que aparece en la planimetría podemos ver ilustrada una rosa de los vientos.	184

Figs. 3.221. y 3.222. Planimetría y Fachada de la Villa Bardellini en Monfumo. Esta villa además de presentar un sistema de climatización natural similar al de la Villa Rocca Pisana resulta interesante por la especial atención que pone a la iluminación natural que se puede apreciar tanto en sección como en planta.....	185
Fig. 4.1. Almacenamiento térmico del suelo según Hollmuller.....	193
Fig. 4.2. Cali, Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales.....	193
Fig. 4.3. Alcatek Cali. Conductos enterrados.	195
Fig. 4.4. Caso 1. Simulación anual de conductos enterrados. Temperaturas exteriores y a la salida.....	196
Fig. 4.5. Caso 1. Simulación sistema enterrado, amortiguación de la temperatura a lo largo del conducto.	196
Fig. 4.6. Caso 1. Simulación sistema enterrado. Temperaturas a la salida del conducto. Datos mensuales. Modelo Hollmuller.	196
Fig. 4.7. Armenia. Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales.	198
Fig. 4.8. Caso 2. Amortiguación térmica a lo largo del intercambiador enterrado.....	199
Fig. 4.9. Prototipo 2. Temperaturas en el interior de la bodega.	200
Fig. 4.10. Prototipo 2. Vectores de flujo de aire en el interior de la bodega.	200
Fig. 4.11. y 4.12 Imágenes tomadas durante la monitorización.....	201
Fig. 4.13. Diagrama Markus/Morris. Condiciones previas.	202
Fig. 4.14. Zonas de confort propuestas sólo con ventilación natural y añadiendo intercambiadores enterrados al diseño.	202
Fig. 4.15. Temperaturas en el interior del edificio solo con ventilación natural	203
Fig. 4.16. Temperaturas en el interior del edificio con ventilación natural y pretratamiento de aire con intercambiadores enterrados.	205
Fig. 4.17. Resultados de monitorización.	206

8 BIBLIOGRAFÍA

ABRAMOWITZ, M., I. STEGUN. Handbook of mathematical functions. National Bureau of Standards, Applied mathematics series, 55, 1972.

ALBA PÉREZ – RENDON, C; A. ADARVE. "Conductive Cooling Using Underground Buried Pipes. Low energy cooling systems for providing comfort to workers in an Beer Warehouse". PLEA 2012 Proceedings.

ALBA PÉREZ – RENDON, C; A. ADARVE. Application of Natural Ventilation and Conductive Ground Cooling Techniques to Improve Thermal Comfort Conditions of Workers in an Industrial Building. Future Build 2013 Proceedings. Pag 111-118

ALBA PÉREZ – RENDON, C; A. ADARVE. Natural Ventilation and Ground Cooling to Improve Thermal Comfort Conditions of Workers in an Industrial Building. Passive Cooling Techniques Applied in an Industrial Building. PLEA 2013 paper.

ALBERTI F. L. (1550) Descrittione di tutta Italia, pp. 420-422, Anselmo Giaccarelli, Bologna; rist. A. Forni Ed., Sala Bolognese.

ALGARÍN COMINO, M. Arquitecturas excavadas: el proyecto frente a la construcción de espacio. Barcelona. Fundación Caja de Arquitectos, 2006

ALVAREZ, S., J. CEJUDO, E. RODRIGUEZ J. GUERRA Full scale experiments in EXPO'92. The bioclimatic Rotunda, in PLEA'91, Architecture and Urban Space, edited by S. Alvarez and al, Kluwer Academic Publisher, 1991, pp 209-216.

ALVAREZ, S., J. CEJUDO, J. GUERRA, J. MOLINA, E. RODRIGUEZ, R. VELAZQUEZ Control climático en espacios abiertos. El proyecto EXPO'92. Grupo de Termotecnia, Universidad de Sevilla, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS ASHRAE. Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA, 1989.

ANONIMO (1877) Statuto della Comunità di Costozza 1290, Vicenza.

ANONIMO (1971) Statuto della Comunità di Costozza 1292, traduzione dal latino di P. Achille Pozzer, a cura della Federazione Italiana Club 3 P e dell'Associazione Provinciale di Vicenza Club Tre P di Longare, U. Ti. V., Vicenza.

ANONIMO (ined.) Codice B dei Feudi, c. 45 t, Archivio della Curia Vescovile di Vicenza.

ANONIMO (ined.) Compedium rerum Vicentinarum,

ANONIMO (ined.) Statuto Vicentino del 1264, Archivio Torre, Vicenza.

ARDUINO G. (1760) *Al Chiariss. Sig. Cavaliere Antonio Vallisnieri Professore di Storia Naturale all'Università di Padova Lettera seconda di Giovanni Arduino Veronese vicentino sopra varie sue Osservazioni fatte in diverse parti del territorio di Vicenza, ed altrove, appartenenti alla Teoria terrestre, ed alla Mineralogia*, Nuova Raccolta d'opuscoli scientifici e filosofici del Calogerà, t. VI, pp. 133-180, Venezia, (B.B.V.: Z.12.7.18).

ATHIENITIS, A.K., M. SANTAMOURIS, A. KYPRIANOU. Application of ground cooling/heating for HVAC air precooling/preheating for the University of Cyprus. *Architecture, city, environment, proceedings of PLEA 2000*, Cambridge, UK, London, James & James, 2000, pp. 94-99.

BAEHR, H.D.; K. STEPHAN, *Wärme-und Stoffübertragung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994 und 1996

BANSAL, N.K., M.S. SODHA and S.S. BHARADWAJ Performance of earth air tunnels. *Energy Research*, 1983, vol. 7, pp. 333-345.

BARBARANO F. (1649-1762) *Historia Ecclesiastica della Città Territorio e Diocesi di Vicenza*, voll. VI, Rosi e Bressan, Vicenza.

BARBARANO F. (ined.) *Annali della Città, Territorio e Diocesi di Vicenza*, ms. Bibl. Bertoliana di Vicenza, (B.B.V.: Gonz. add. 49).

BARBARANO, Libro VI, p. 137, 1762

BARLES, S. *L'urbanisme souterrain*. Paris Presses Universitaires de France, 1995

BEMBO P. (1552) *Della Historia Vinitiana di M. Pietro Bembo card. volgarmente scritta*, lib. X, p. 143, Venezia.

BENKERT, S., F.D. HEIDT and D. SCHÖLER Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*, Texas USA, J.D. Spitler and J.L.M. Hensen, Eds., 1994, vol. 2, pp. 9-16.

BEVILACQUA A. (1983) *Ricerche e notizie per una storia artistica di Costozza Longare e Lumignano*, in AA.VV. *Costozza*, pp. 871-966, Cassa Rurale e Artigiana di Costozza e Tramonte-Praglia, Vicenza.

BIONDO F. (1527) *Ital. Illustr.* Marca Tarvis., p. 104 tergo in fol.

BIRKENMAJER A. (1972) *Etude su Witelo. IVme partie: Witelo et l'université de Padue*, *Studia Copernicana*, t. IV: 362-370 e 383-384, Wroclaw.

BLAEU J. (1662) *Atlas maior, sive Cosmographica Blauiana Qua solum, salum, Coelum, accuratissime describuntur*, voll. 11, Labore & Sumptibus Joannis Blaeu, Amsteloedami.

BOJIC, M., N. TRIFUNOVIC, G. PAPADAKIS and S. KYRITSIS Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building. *Energy*, 1997, 22(12), pp. 1151-1158.

BONIFACIO G. (1744) *Istoria di Trivigi. Col ritratto dell'autore. Dall'origine della città fino all'anno 1623*, p. 374, Albrizzi, Venezia.

BOSSOKEN, E. Energy efficiency of room air conditioners. EERAC Group, Study for the DG XVII CEC, 1999.

BOULARD, T., E. RAZAFINJOHANY and A. BAILLE Heat and water vapour transfer in agricultural greenhouse with an underground heat storage system, part 1 and 2. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 45, pp. 175-194.

BREDENBECK, H. Rock bed storage inside of greenhouses. *Acta horticulturae*, 1984, 148, pp. 739-744.

BRENTARI O., CAINER S. (1887) *Guida storico-alpina di Vicenza Recoaro e Schio*, pp. 251, Pozzato, Bassano; rist. 1977, A. Forni, Bologna.

BURCHARDT J. (1984) *Witelo filosofo della natura del XIII sec. Una biografia*, Accademia Polacca delle Scienze, pp. 1-87, Ossolineum, Wroclaw.

BUSCHING F. (1773) *Nuova Geografia di Federico Busching*, tradotto in lingua toscana dall'ab. Gaudioso Jagermann, vol. 22, pp. 146-147, Zatta, Venezia (B.B.V.: F.2.3.23).

CABEZA LAINEZ, J.M. *Fundamentos de Transferencia Radiante Luminosa*. La Coruña. Netbiblo. 2009

CABEZA LAINEZ, J.M. The Quest for Light in Indian Architectural Heritage. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. Vol. 7. 2008. Pag. 39-46

CABEZA LAINEZ, J.M., JIMENEZ VERDEJO J.R., SANCHEZ-MONTAÑES, B., PEREZ CALERO, J.I. The Key-Role of Eladio Dieste, Spain and the Americas in the Evolution from Brickwork to Architectural Form. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2009. Pag. 355-362

CABEZA LAINEZ, J.M., PEREZ DE LAMA, J. The Open Spaces of Expo'92, in PLEA'91, *Architecture and Urban Space*, edited by S. Alvarez and al, Kluwer Academic Publisher, 1991, pp 217-222.

CABEZA LAINEZ, J.M., PEREZ DE LAMA, J. The Patio; A constant in Mediterranean Architecture. Climate and Symbolism, in PLEA'91, *Architecture and Urban Space*, edited by S. Alvarez and al, Kluwer Academic Publisher, 1991, pp 269-274.

CABIANCA J., LAMPERTICO F. (1861) *Vicenza e il suo territorio* per Jacopo Cabianca e Fedele Lampertico, in *Grande illustrazione del Lombardo Veneto*,

a cura di Cesare Cantù, vol. IV, Guglielmini ed., Milano; rist. 1975 Storia di Vicenza e sua Provincia, F. Sardini ed., Brescia.

CALDOGNO F. (1598) Relatione delle Alpi Vicentine e de' passi e popoli loro del conte Francesco Caldogno, ried. 1972, pp.109, Gianni Faè ed., Verona.

CALVI P. (1772) Biblioteca e storia di que' scrittori così della città come del territorio di Vicenza che pervennero fin ad ora a notizia del P.F. Angiolgabriello di Santa Maria Carmelitano scalzo vicentino, vol. I, p. 101, Gio:Battista Vendramini Mosca, Vicenza.

CALVI P. (ined.) Il Covalo di Costozza per Sua Eccellenza il Signor Conte Ottavio Trento,

CANOVA A., MANTESE G. (1979) I castelli medioevali del Vicentino, pp. 282, Accademia Olimpica, Vicenza.

CAPPELLARO L. (1959) Costozza nei tempi, vol. I, pp. XVI-319, Scuola tip. Istituto S. Gaetano, Vicenza, (B.B.V.: Gonz. 17.6.12).

CASTELLINI S. (1783-1822) Storia della Città di Vicenza ove si vedono i fatti e leguerre dei Vicentini così esterne come civili dall'origine di essa città sino all'anno 1630, lib. I-XII (parte I), Francesco Vendramin Mosca stampatore, lib. XII (parte II)- XIX, Tip. Parise ed., Vicenza.

CASTELLO M. (1966) Lavori nelle grotte di Costozza sul finire della guerra, in AA.VV. Poesia scienza storia sui Colli Berici, pp. 28-32, Tip. C.B.F., Costozza.

Catastico della famiglia Trento sin dal suo arrivo nella città di Vicenza manoscritto, tra il 1700 e il 1705, da Francesco Tommasini per incarico del co. Orazio Trento

CATULLO T. A. (1841) Sulle caverne di Costozza nel Vicentino parole del professore Tommaso Antonio Catullo, pp. 1-15, tip. Angelo Sicca, Padova; Annali di Scienze Naturali, t. VI, pp. 241-265, Bologna.

CATULLO T. A. (ined.) Lettere manoscritte, allegate alle "Osservazioni geognostiche zoologiche", Padova 1840, {B.B.V.: Gonz. 245.23 (I)}.

CAZZANIGA A., FURLANETTO L., MOLON M.D. (ined.) Il sistema di raffrescamento naturale delle ville di Costozza (Vicenza), relatori A. Fanchiotti & G. Scudo, pp. 330, Ist. Universitario di Architettura, anno acc. 1980-81, Venezia.

CENTRO DE ESPACIO SUBTERRÁNEO DE LA UNIVERSIDAD DE MINESOTA Tierra y cobijo: diseño de casas semienterradas. Barcelona. Gustavo Gili, 1980

CENTRO DE ESPACIO SUBTERRÁNEO DE LA UNIVERSIDAD DE MINNESOTA Conjuntos de viviendas semienterradas: comportamiento energético y aspectos urbanísticos. México Gustavo Gili, 1983

CEVESE R. (1980) Ville della provincia di Vicenza, Rusconi ed., Milano.

CEVESE R. (1980) Ville della provincia di Vicenza, Rusconi ed., Milano.

CHANG, A. I. T. El Dao de la Arquitectura. Traducción y Estudio Introductorio de José María Cabeza Lainez. Colección de Estudios Asiáticos. Editorial Comares. Granada 2011.

CHEN, B., T. WANG, J. MALONEY and M. NEWMAN. Measured and predicted cooling performance of earth contact cooling tube. Proceedings of ASES 1983 Annual Meeting, Minneapolis, MN, 1983.

CLAESSON, J., A. DUNAND Heat extraction from the ground by horizontal pipes : a mathematical analysis. Stockholm, Swedish Council for Building Research, 1983.

DA PORTO L. (1857) Lettere storiche di Luigi da Porto Vicentino dall'anno 1509 al 1528, a cura di Bartolomeo Bressan, pp. 447, Felice Le Monnier, Firenze.

DA SCHIO A. (1950) La coltivazione dei funghi nelle grotte di Costozza, Questa è Vicenza: invito alla terra vicentina ed alla sua fiera, pp. 43-48, Ente Fiera Vicenza, Vicenza.-

DA SCHIO A. (1960) I funghi questi cavernicoli, Vicenza, Il/1, Vicenza.

DA SCHIO Alvise (1874) La Grotta di Costozza, Giornale della Provincia di Vicenza, n. 146, 5 dicembre 1874, Vicenza.

DA SCHIO Alvise (1889) Il Melolanthia vulgaris, Agricoltura Vicentina, 1 giugno 1889, Vicenza.

DA SCHIO Alvise (1913) Costozza, Al M.R.D. Luigi Zanellato bene augurato arciprete e vicario foraneo di Costozza nel giorno solenne del suo ingresso Alvise da Schio offre in omaggio ossequiente, pp. 22, Vicenza.

DA SCHIO G. (1839) Ipotesi sul significato di cinque iscrizioni dette volgarmente etrusche od euganee pur mò scoperte nel Vicentino, dettata dal primo che s'incontrò a vederle, pp. 16, Tip. di Alvisopoli, Venezia.

DA SCHIO G. (1850) Le antiche iscrizioni che furono trovate in Vicenza e che vi sono illustrate per opera di Giovanni da Schio, pp. 128, tavv. XXI, Baseggio, Bassano.

DA SCHIO G. (1853) Scoperta di un Ustrino romano, fatta nel Regno Lombardo-Veneto Provincia di Vicenza, Bollettino dell'Istituto di Corrispondenza Archeologica per l'anno 1853, pag. 151, Tip. delle Scienze, Roma.

DA SCHIO G. (ined.) Vicentinerie raccolte a Milano nell'anno 1834, ms. in Archivio da Schio, Ca' d'Oro Vicenza.

DA SCHIO G. (ined.) Zibaldone di storia vicentina politica e biografica avanti l'anno MCCCCIV, ms. in Biblioteca Bertoliana Vicenza (Gonz. 24.9.11/12 = 2574-2575).

DA SCHIO G., TREVISIOL G., PERIN G. (1947) Scienza e poesia sui Berici, pp. 288, Tip. Commerciale ed., Vicenza, rist. 1985, Cartolibreria Pederiva, Grancona (Vi).

DA SCHIO, F.T., Storia Genealogica delle Famiglie Nobili Vicentine. Biblioteca Bertoliana Vicenza.

Dall'ACQUA G. D. (ined.) Disegno dell'Antro e Grottesco detto il Covalo di Costoza esistente nel Monte della villa di Costoza Territorio Vicentino rilevato da me sottosc.to Publ.co Perito in ubbidienza del mandato dell'Ill.mo, & Ecc.mo S. Giacomo Trevisan Pod.tà V. Cap.o di Vicenza de di 30 Aprile 1759. Terminato in Vicenza questo di 8 maggio 1759, Rason Vecchie b. 193, disegno 775 (neg. 7000, fot. 817), Archivio di Stato di Venezia.

Dall'ACQUA G. D. (ined.) Lettera informativa diretta al Padre Coronelli (1712), in Miscellanea del Maccà, T. VI, pp. 287-300 (B.B.V.: Gonz. 24.8.24 n. 2083).

DE BON A. (1937) Romanità del territorio vicentino, pp. 80, Tip. Commerciale ed., Vicenza.

DE BON A. (1941) Storie e leggende della terra veneta. Le strade del diavolo, pp. 228, Tip. Pasubio, Schio.

DE MORI G. (1932) Vicenza e la sua provincia, Vicenza.

DE PAEPE, M. Three dimensional time accurate unstructured finite volume technique for modelling ground-coupled heat exchangers. Proceedings of HEFAT'2002, 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Satara Kamp, Kruger National Park, South Africa, 2002.

DEGLI UBERTI Fazio (1819) I sei libri del Dittamondo, t. 9, Andreola, Venezia (B.B.V.: A.13.10).

DOGLIONI G. N. (1623) Anphitheatro di Europa, in cui si ha la descrizione del mondo celeste, et elementare, per quanto aspetta alla cosmografia. Et si segue in narrar di essa Europa il sito et confini, con le provincie, regioni... di Gio. Nicolò Doglioni, nobile bellunese..., pp. {72} 1378, Giacomo Sarzina, Venezia, (B.N.M.: :151.D.59).

DONDI DALL'OROLOGIO O. (1885) Una visita alle cave di Costozza. Versi, in 8°, pp. 21, Tip. del Seminario, Padova.

DOTTORI C. (1652) L'asino. Poema eroicomico con gli argomenti di Alessandro Zocco e le annotazioni del co. Sertorio Orsato, in 12°, Combi, Venezia; ried.

1796, in 8°, pp. LVI-342, Brandolini, Padova; 1796, in 16°, pp. XXVII-462, Vendramini Mosca, Vicenza (B.B.V.: Gonz. 10.2.17).

DRAGONZINO G. (1525) Nobilità di Vicenza, per Francesco Bindoni e Mafeo Pasini, Venezia; ried. 1981 a cura di Franco Barbieri e Flavio Fiorese, pp. 181, Neri Pozza ed., Vicenza.

FABIANI R. (1902) Le grotte dei Colli Berici nel Vicentino, *Antologia Veneta*, 3/2: 1-16, Feltre.

FERRARI O. (1676) *Octavii Ferrarii Origines linguæ italicæ*, p. 85, c. 2, Typis Petri M. Frambotti Bibliofilæ, Patavii.

FERRETO DE FERRETI (1908-1920) Le opere di Ferreto de Ferreti Vicentino, a cura di Carlo Cipolla, *Fonti per la storia d'Italia pubblicate dall'Istituto Italiano Scrittori - Secolo XIV*, vol. I, pp. 365, (1908), vol. II, pp. 298, (1914), vol. III, pp. 168, (1920), Roma.

FORMALEONI V. (1778) Topografica descrizione delle Provincie Venete in Terraferma, t. ultimo, p. 84.

FORMENTON F. (1867) *Memorie storiche della città di Vicenza dalla sua origine fino all'anno 1867*, pp. 1094, Tip. G. Staider, Vicenza.

GARZADORE Alberto (ined.) *Descrizione del Covolo del Vento*,

GATARI A. (1909) *Cronaca carrarese* [AA. 1318-1407], a cura di A. Medin e G. Tolomei, *Rerum Italicarum Scriptorum "Raccolta degli Storici Italiani dal Cinquecento al Millecinquecento ordinata da L. A. Muratori"*, XVII/I: 296, Città di Castello.-

GAUTHIER, C., M. LACROIX and H. BERNIER Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses. *Solar Energy*, 1997, 30(6), pp. 333-346.

GNIELINSKI, V. Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen. *Forsch. Ing.-Wes.*, 1975, vol. 41(1), pp. 8-15.

GRIMME E. (1966) Storia delle officine C.A.R.I.M. nelle grotte di Costozza, in AA.VV. *Poesia scienza storia sui Colli Berici*, pp. 22-27, Tip. C.B.F., Costozza.

GRISON P. (1928) Studio interpretativo ed etimologico sopra le iscrizioni preromane di Magrè e d'altri luoghi del Veneto (Piovene, Colli Berici, Padova, Feltre) e sopra un'altra iscrizione di Montecchia di Crosara, pp. 45, *Arti Grafiche Scledensi*, Schio (Vi).-

GROTO L. (1601) *Lettere famigliari di Luigi Groto Cieco d'Adria*, Venezia.

GRUPPO GROTTA "G. Trevisiol" (1958) Il valore dei Covoli di Costozza in un chiarimento del Gruppo Grotte, Il Gazzettino, 29 luglio 1958, Venezia.

GUERIN-DALLE MESE J. (1983) Una cronaca vicentina del Cinquecento, pp. 236, Accademia Olimpica, Vicenza.

GUICCIARDINI F. (1583-1587) La Historia d'Italia di messer Francesco Guicciardini gentil'huomo fiorentino, Giorgio Angelieri (1583) e Domenico Farri (1587), Venezia, ried. 1975 La storia d'Italia, vol. 2, Mondadori, Milano.

HIPÓCRATES, 0460-0377 A.J.C Tratados hipocráticos. 2, Sobre los aires, aguas y lugares; Sobre los humores; Sobre los flatos ; Predicciones I ; Predicciones II. Introducción, traducciones y notas por J. A. López Férez y E. García Novo

HOLLMULLER P. Potential of inertial ventilation for passive cooling in Brazilian climates. Proc. of Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment 2005, Santorini, Greece

HOLLMULLER P. Puits canadien et techniques apparentées. Etude de cas 2 : Rafrâichissement par collecteur souterrain à eau, bâtiment Perret à Satigny, Genève. Géocooling, sondes géothermiques et puits canadiens pour rafraîchir les bâtiments, 18 mai 2005

HOLLMULLER P. Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Director Pr Nicolas Gisin. Tesis No 3357. Genève, 2002

HOLLMULLER, P., B. LACHAL TRNSYS compatible moist air hypocaust model, Final report. Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, 1998.

HOLLMULLER, P., B. LACHAL, C. SOUTTER Serre ISW Waedenswil avec stockage de chaleur par tubes enterrés : Analyse énergétique. Rapport interne, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, 1999.

HOLLMULLER, P., B. LACHAL, O. JOLLIET Projet COSTEAU. Rapport Final, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève.

HOLLMULLER, P., B. LACHAL, P. JABOYEDOFF, A. REIST, J. GIL, L. DANLOY Geoser: stockage solaire à court terme en serres horticoles. Rapport final, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève.

HOLLMULLER, P., B. LACHAL, W. WEBER, M. BONVIN, P. CORDONIER, J. DERIVAZ, C. ANÇAY Transformation du château de Valère en musée : un concept énergétique répondant à de fortes contraintes. Proceedings de CISBAT 2001, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001, pp. 285-290.

HOLLMULLER, P., LACHAL, B. Rafrâichissement et préchauffage par tubes enterrés : mesures, simulations et calculs économiques. CISBAT Lausanne. 1999. Pag. 313-320

HOLLMULLER, P., LACHAL, B., WEBER, W. [ET AL.] Transformation du Château de Valère en musée: un concept énergétique répondant à de fortes contraintes. CISBAT'01, Lausanne. 2001. Pag. 285-290

HUBER, A., S. REMUND Program for the simulation of air-earth heat exchangers. Zurich, Huber Energietechnik, 1996.

INCROPERA, F. ET D. DE WITT. Fundamentals of heat and mass transfer. Third Edition, John Wiley & Sons, 1990.

KENDA, B. Academia Eolia Revisited: Architectural and Academic Aspirations of the Renaissance Humanist Francesco Trento. Piranesi, Middle-European Architectural Journal for the Culture of Environment, Ljubljana: Piranesi Ltd., No. 19/20 Vol 11, Autumn 2004

KENDA, B. Aeolian Winds and the Spirit in Renaissance Architecture. Edited with Introduction by Barbara Kenda, Foreword by Joseph Rykwert. Routledge, Francis & Taylor, London and New York, 2006.

LACHAL, B. et W. WEBER Les besoins d'énergie thermique des bâtiments. Quels systèmes énergétiques pour le XXIème siècle ?, édités par J.-L. Bertholet, M. Garbely, B. Lachal, F. Romero et W. Weber, Série « Energie, environnement et société », CUEPE, Université de Genève, 2000.

LACHAL, B., P. GALLINELLI, P. HOLLMULLER, Y. FINO, PASCOOL Aymon building. Handbook on passive cooling. Vol.2 : Case studies, S. Yannas et E. Maldonado, Eds., Luxembourg, European Commission, Directorate General XII for Science Research and Development, 1994.

LACHAL, B., P. HOLLMULLER Transformation du château de Valère en musée : effets climatiques de la nouvelle exploitation. Rapport final, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, 1993.

LACHAL, B., P. HOLLMULLER, E. PAMPALONI, J. PUTALLAZ Evaluation des performances du puits canadien de l'immeuble locatif du 19 rue des Caroubiers. 1227 Carouge, Service Cantonal de l'Energie, Canton de Genève, 1996.

LACHAL, B., R. MELDEM, W. WEBER, C. ANCAY, O. GUIBAN Use of basement in passive cooling of an administrative building in Sion (Switzerland). PLEA'91, Architecture and Urban Space, edited by S. Alvarez and al, Kluwer Academic Publisher, 1991, pp. 737-742.

LACHAL, B., W. WEBER, O. GUIBAN Simplified methods for the thermal analysis of multifamily and administrative buildings. ASHRAE Transactions, part 1, 1992, pp. 1151-1159.

LAMBERT C. F. (1778-1779) Raccolta di osservazioni curiose sopra la maniera di vivere, i Costumi, gli Usi, il Carattere, le differenti Lingue, il Governo, la Mitologia, la Cronologia, la Geografia Antica e Moderna, le Cerimonie, la Religione, le Meccaniche, l'Astronomia, la Medicina, la Fisica particolare, l'Istoria Naturale, il Commercio, la Navigazione, le Arti e le Scienze de differenti popoli dell'Asia, dell'Africa, e dell'America dell'abate Lambert, tomi 15 in 8 voll., Sebastiano Coleti, Venezia.

LAMPERTICO F. (1877) Statuto della Comunità di Costozza, 1290, a cura di Fedele Lampertico, pp. XIII-114, Paroni, Vicenza.

LEÑERO BARDALLO, F. Estudio de la ventilación natural en el interior de recintos. Proyecto fin de carrera. Tutor, Servando Álvarez Domínguez.

LOSCHI A. (1560) Compendii historici, Vicenza.

LOSCHI A. (1652) Compendi historici, pp. 360, Gio: Pietro Pinelli, Venezia.

LOUBES, J. P. Archi troglo. Roquevaire Parenthèses, 1984

MACCA' G. (1813) Storia del Territorio Vicentino, t. IV, pp. 360, Menegatti, Caldoggno, rist. 1972, Libreria Alpina Degli Esposti, Bologna.

MACCA' G. (1799) Storia della famosa grotta detta volgarmente il Covolo, o Covalo di Costoza dedicata all'antico e nobile collegio de' sigg. Notaj di Vicenza, pp. XXII-104, Giovanni Rossi, Vicenza; rist. 1989, Cartolibreria Pederiva, Grancona (Vi).

MACCÀ, G. (1799) Storia della famosa grotta detta volgarmente il Covolo, o Covalo di Costoza dedicata all'antico e nobile collegio de' sigg. Notaj di Vicenza, pp. XXII-104, Giovanni Rossi, Vicenza; rist. 1989, Cartolibreria Pederiva, Grancona (Vi).

MAGANZA Gb. (1610) Sonaggetto de Magagnò al Cellente Signor Francesco Trento, Rime de Magagnò, pp. 78, Menon. e Begotto, Venezia.

MAGINI A. (1620) Geografia di Tolomeo, p. 2, p. 94, Padova.

MALO ARAGÓN, B. J. Modelo simplificado para el cálculo de caudales de ventilación en recintos con tiro térmico. Proyecto fin de carrera. Tutor, Servando Álvarez Domínguez.

MARESCALCHI A. (1933) La coltivazione e l'industria dei funghi, Corriere della sera, 4 giugno 1933, Milano.

MARZARI G. (1604) *La Historia di Vicenza*, pp. 223, Giorgio Greco, Vicenza; rist. 1973, *Historiae Urbium et Regionum Italiae Rariores*, LXVII, Arnoldo Forni ed., Bologna.

MATSON N. E., SHERMAN, M.H. *Why We Ventilate Our Houses – An Historical Look*. Proc. 2004 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, Vol. 7, pp. 241-250, American Council for an Energy Efficient Economy, Washington, DC (2004)

MAZZOTTI G. (1962) *Ville venete in restauro*, *Le vie d'Italia*, LXVIII/5: 613-614, Milano.

MERCATORE G. (1623) *Atlas, sive cosmographicae Meditationes de Fabrica Mundi et Fabricati Figura denno anctus Editio quinta*, p. 301-302, H. Hondii, Amsteloedami (B.B.V.: F.13.5.).

METZ, D. *La supercasa : enterrada, superaislada y doblemente protegida*. México : Gustavo Gili, 1983

MICHMACHER, C. *Manuel de construction rurale et alternative*. Editions Alternatives. 1999.

MILAN MASSARI G. (1842) *Frammenti del libro VIII di una storia inedita di Vicenza scritta da Giacomo Milan Massari*, pp. 60, Tip. A. Minelli, Rovigo.

MOCENIGO A. (1562) *La guerra di Cambrai fatta a' tempi nostri in Italia*. Tra gli illustri Signori Venetiani con tutti i Prencipi di Christianità. Ove si narra Il fatto d'arme di Ghiera d'Adda. L'assedio di Padova & di Brescia. Il fatto d'arme di Ravenna. Il fatto d'arme di Vicenza. Il fatto d'arme di Marignano. Scritta con gran diligenza dal Clarissimo Senatore M. Andrea Mocenigo Gentiluomo Venitiano, pp. 140, s.n. ed., Venezia.

MONACUS PATAVINUS (1726) *Chronicon de rebus gestis in Lombardia praccipue et Marchia Tarvisiana ab anno 1207 usque ad annum 1270*, R.I.S., tomo VIII, pp. 661-734, Milano.

MORICONI A. (1983) *Il covolo di Costozza nella storiografia e nella mentalità popolare*, in AA.VV. *Costozza: 475-490*, Cassa Rurale e Artigiana di Costozza e Tramonte-Praglia, Vicenza.

MORSOLETTO A. (1983) *Dalla protostoria al tramonto del Medioevo*, in AA.VV. *Costozza: 55-472*, Cassa Rurale e Artigiana di Costozza e Tramonte-Praglia, Vicenza.

MORSOLIN B. (1893) *Nicolas Poussin et le "Covolo" de Costozza dans le Vicentin*, in *Art de Paris* 15 mars et 15 mai 1983, XIX, I, 6-19, nozze Franco-Folco, pp. 24, tip. Fabris, Vicenza.

MURANO M., MARTON P. Las Villas del Véneto. Colonia Könemann, 1999

MURATORI L. A. (1744) Annali d'Italia dal principio dell'Era Volgare fino all'Anno 1749 compilati da Lodovico Antonio Muratori Bibliotecario del Serenissimo Duca di Modena, tomo X, Dall'Anno 1501. dell'Era Volgare all'Anno 1600., pp. 561, Giambattista Pasquali, Milano.

MUSSATO A. (1636) Historia Augusta Henrici VII caesaris, et alia, quae extant opera, ex Tip. Ducale Pinelliana, Venezia (B.C.V.: Gonz. 3.9.12).

NICOLETTI, M. L'architettura delle caverne. Roma [etc.] Laterza, 1980

NICOLOSI Gb. (1660) Ercole e Studio Geografico, tomo primo nel quale si descrive generalmente il Globo terrestre secondo la natura, secondo la formalità che qui ha dato l'uomo, e secondo il ripartimento presente, tomo II il quale contiene le tavole e le descrizioni di detta opera, Mascardi, Roma.

PAGELLO B. (1799) De labyrinto Vicentino, et de laudibus eius, et quod locus ille amantium furtis accomodus sit. Elegia,

PAGLIARINI B. (1663) Croniche di Vicenza di Battista Pagliarino, pp. 348, Giacomo Amadio, Vicenza, rist. 1971, Historiae Urbium et Regionum Italiae Rariores, XLVII, Arnoldo Forni ed., Bologna.

PAGLIARINI B. (1663) Croniche di Vicenza di Battista Pagliarino, pp. 348, Giacomo Amadio, Vicenza, rist. 1971, Historiae Urbium et Regionum Italiae Rariores, XLVII, Arnoldo Forni ed., Bologna.

PALLADIO A. (1570) I quattro libri dell'Architettura di Andrea Palladio. Ne' quali dopo un breve trattato de' cinque ordini, & di quelli avvertimenti, che sono piu necessarij ne fabricare; si tratta delle Case Private, delle Vie, de i Ponti, delle Piazze, de i Xisti, et de' Tempij, Dominico de' Franceschi, vol. I: 1-67, vol. II: 1-78, vol. III: 1-47, vol. IV: 1-134, Venezia; rist. anastatica 1976, Hoepli ed., Milano.

PALLADIO, A. 1508-1580 Andrea Palladio : los cuatro libros de la arquitectura. TTraducción al español por Arq. Carlos Pérez Infante; De la versión en inglés de Issac Ware (1738). México : Universidad Autónoma Metropolitana : Limusa, 2005

PARTENIO B. (1579) Carminum libri III Bernardini Partheni Spilinbergii, Venezia.

PASINI L. (1845) Adunanza del giorno 25 novembre 1944, Atti Istituto Veneto SS.LL.AA., s. I, IV: 49-54, Venezia.

PEREZ CALERO, J.I.; C. ALBA PÉREZ – RENDÓN. "Composites in the design optimization of Biconvex Refractive Solar Concentrators. Study and calculation of prototypes". Artículo para la revista Advanced Materials Research.

PEREZ CALERO, J.I.; C. ALBA PÉREZ – RENDÓN. "Nuevas Tecnologías para la Arquitectura y el Urbanismo en relación a la Investigación Arquitectónica y su divulgación". Libro de Actas del Seminario de Innovación, Investigación y Transferencia de la E.T.S.A.S.

PIGAFETTA F. (1608) *Descrittione del Territorio et Contado di Vicenza*, in A. Ortelio "Teatro del Mondo", Anversa; ried. 1974 a cura di A. Da Schio e F. Barbieri, Amm. Provinciale di Vicenza ed., Vicenza.

PIOVENE G. (1971) *Viaggio in Italia*, p. 44, Mondadori ed., Milano.

PIVATI G. (1746) *Nuovo dizionario scientifico e curioso sacro-profano*, voll. 10, B. Milocco, Venezia.

PUPPO, E. *Acondicionamiento natural y arquitectura : ecología en arquitectura*. Barcelona : Marcombo, 1972

RAMBALDO F. (ined.) *Cogolo di Costozza detto della guerra rilevato, si crede, dal fu Co: Francesco Rambaldo Ingegnere in capo e copiato dall'originale, che fu in proprietà del Co: Giuseppe Marzari questo giorno 9 agosto 1841*, [B.B.V.: Gonz. 30.7.4 (4) Ds Z].

REATO E. (1983) *Le visite pastorali a Costozza, Longare e Lumignano nei secoli XV-XVIII*, in AA. VV. *Costozza*, pp. 645-722, Cassa Rurale e Artigiana di Costozza e Tramonte-Praglia, Vicenza.

RIVETTA (Toddi) S. P. (1936) *Dove le ragazze non possono dir no e altri itinerari bizzarri*, pp. 144-154, Casa Editrice Ceschina, Milano.

ROLANDINI PATAVINI (1905) *Cronica in factis et circa facta Marchie Trivixane*, [1200cc.-1262], a cura di A. Bonardi, *Rerum Italicarum Scriptores*, t. VIII, p. I, pp. XX-376, Città di Castello.

ROSSETTI Gb. (1780) *Descrizione delle pitture, sculture ed architetture della città di Padova, con alcune osservazioni intorno ad esse, ed altre curiose notizie*, pp. 382, Stamperia del Seminario, Padova.

RUGGERI SOMMASCO F. (1629) *Declamatorum oratoriarum par altera auctore Franc.o Rugerio Mediolan*, Mediolani.

SANUTO M. (1847) *Itinerario di Marin Sanuto per la terraferma veneziana nell'anno MCCCCLXXXIII*, pp. 157-LII, Tip. del Seminario, Padova.

SCAMOZZI V. (1615) *Idea dell'architettura universale, divisa in 10 Libri*, Giorgio Valentino, Venezia.

SCAMOZZI, V. 1552-1616 *L'idea della architettura universale*. [Bologna] Arnaldo Forni 1982

SCHILLER G. (ined.) Atti della causa da Schio contro il Ministero della Difesa-Esercito, dattiloscritto 3 febbraio 1981, Venezia.

SCOTO A. (1649) Itinerario d'Italia ovvero nova descrizione de' viaggi principali d'Italia, nella quale si ha piena notizia di tutte le cose più notabili e degne di essere vedute, Padova.

SCOTO F. (1610) Itinerario d'Italia di Francesco Scoto, , Roma.

SEMENTATO, C. The Rotonda of Andrea Palladio. Pennsylvania : Pennsylvania State University Press, 1968

SERRA FLORENSA R., COCH ROURA, H. Arquitectura y energía natural. Edicions UPC, 1995. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. 1995

SIMANCAS YOVANE, K. Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo. UPC. Tesis Dir. Serra R. 2003

SMEREGLO N. (1883) Annales Civitatis Vicentiae Nicolai Smeregli, negli Scritti storici e letterari di Fedele Lampertico, vol. II, pp. 275-298, Le Monnier, Firenze; ed. 1910 Annales Civitatis Vicentiae {AA. 1200-1312}, a cura di G. Soranzo, Rerum Italicarum Scriptores, t. VIII, p. 5, Zanichelli, Bologna.

SOLDEVILA, A. Cinc edificis ensorrats. Quaderns 252. Pag. 120-125.

STOPPANI A. (1875) Il Bel Paese, Luigi Trevisini ed., Milano.

TENTORI C. (1785) Saggio sulla storia civile, politica, ecclesiastica e sulla corografia e topografia degli stati della Repubblica di Venezia, voll. 12, Storti, Venezia.

TOMMASINI F. (ined.) Catastico Trento, 5 tomi, Archivio Torre, ms. in Biblioteca Bertoliana, Vicenza.

TOMMASINI F. (ined.) Genealogia Historica delle Famiglie Nobili Vicentine, ms. in Biblioteca Bertoliana, Vicenza (Gonz. 26.8.3. = 3336-3337).

TRAVERSO G.B. (1914) La coltivazione dei funghi commestibili nelle grotte di Costozza (Vi), Natura, vol. V, Tip. Fusi, Pavia.

TRISSINO G. (ined.) Gasparis Trissini aliorumque Illustrium Poetarum in effigiem & Aeoliam Per Illustrissimi & Eccellentissimi viri Francisci Tridenti Carmina. Latina, Graeca Italica, Celtica, & patavino-dorica scripta quedam sunt autographa quaedam exemplaria Ex dono nobilissimae foeminae Octaviae eiusdem Francisci. filiae & comitis Ulieni Trissini Uxor, ms. in Biblioteca Ambrosiana, Milano (A.16. INF.).

TUA O. (1934) Orazio Marinali e le statue da giardino nelle Venezie, L'illustrazione italiana, LXI/5: 162,

TUA O. (1935) O. Marinali e i suoi fratelli, *Rivista d'arte*, XVII/3: 304,

TURNER, J.S. *The extended organism: the physiology of animal-built structures*.
Harvard University Press. 2000

VERCI Gb. (1779) *Storia degli Ecelini*, t. 3, Remondini, Bassano.

VERCI Gb. (1786-1790) *Storia della Marca Trivigiana e Veronese*, t. XX, voll. XII,
G. Storti, Venezia.

VIGNA F. (ined.) *Documenti per la Storia Vicentina*, 13 voll., (B.B.V.: Gonz. 453,
5.7, 2-13, 2700).

VIRGILIO MARÓN, P., 0070-0019 A. C. *Eneida*. Traducción en versos castellanos
por Miguel Antonio Caro. Madrid Librería de la Viuda de Hernando y Cia., 1870-
1881

WAGNER, E. *Earth and cave architecture*. Sulgen, Switzerland Niggli AG, 1994

WITTELO (1535) *Vitellonis mathematici doctissimi, id est de natura, ratione et
projectione radiorum usus, luminum, colorum atque formarum, quam vulgo
Perspectuam vocant, libri X, nunc primum opera mathematicorum
praestantissimorum dd. Georgii Tanstetter et Petri Apiani in lucem edita*,
Norimbergae.

ZAGO O. (ined.) *Della maravigliosa Grotta, detta il Covalo di Costoza, e
dell'antico Teatro di Berga: l'una fuori l'altra dentro alla Città di Vicenza*,
annotazioni varie del Conte Ortensio Zago, (B.B.V.: Gonz. 25.10.1. n. 2985, 2986
e 2987).

ZUGLIANO G. (1889) *Episodi di guerra in Vicenza l'anno MDIX*, *Cronaca*, 22 pp.,
Brunello e Pastorio, Vicenza.

ZUGLIANO G. (ined.) *Annali della guerra di Cambrai*, ms. lib. I: 1509, 108 pp., lib.
II: 1510, 44 pp., lib. III: 1511, 36 pp., lib. IV: 1512: 96 pp., (B.B.V.: Gonz. 30.7.42,
3099).